



Tekniske systemløsninger til energirenovering - Fokus på 60/70ér parcelhuses klimaskærm

Delrapport 1

Tommerup, Henrik M.; Grøn Bjørneboe, Matilde; Bjarløv, Søren Peter; Svendsen, Svend ; Jespersen, Gert ; Klingbeil, Georg; Christensen, Gert ; Haulrik, Bjarne; Sørensen, Lars S.

Publication date:
2015

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Tommerup, H. M., Grøn Bjørneboe, M., Bjarløv, S. P., Svendsen, S., Jespersen, G., Klingbeil, G., Christensen, G., Haulrik, B., & Sørensen, L. S. (2015). *Tekniske systemløsninger til energirenovering - Fokus på 60/70ér parcelhuses klimaskærm: Delrapport 1*. DTU Byg, Danmarks Tekniske Universitet. BYG Sagsrapport No. SR-16-01 (DK)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Tekniske systemløsninger til energirenovering - Fokus på 60/70ér parcelhuses klimaskærm



Henrik Tommerup
Matilde Grøn
Søren Peter Bjarløv
Svend Svendsen
Gert Jespersen
Georg Klingbeil
Gert Christensen
Bjarne Haulrik
Lars S. Sørensen

Sagsrapport

Institut for Byggeri og Anlæg
2015

DTU Byg-Sagsrapport SR-16-01 (DK)
Marts 2015

Tekniske systemløsninger til energirenovierung

– Fokus på 60/70' er parcelhuses klimaskærm

EUDP 2009-II projekt

”Udvikling af systemløsninger til energimæssigt vidtgående klimaskærmsrenovering af eksisterende bygninger samt demonstration på 3 typiske parcelhuse fra perioden 1960-80”

Delrapport 1

Marts 2015



FORORD

Denne rapport er udarbejdet i innovationsprojektet med titlen ”Udvikling af systemløsninger til energimæssigt vidtgående klimaskærmsrenovering af eksisterende bygninger samt demonstration på 3 typiske parcelhuse fra perioden 1960-80”, som DTU Byg driver i samarbejde med en række firmaer (se nedenfor). Projekt støttes økonomisk af Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrations Program (EUDP09-II, J.nr. 64009-0245).

Rapporten omhandler tekniske systemløsninger til energirenovierung med fokus på klimaskærmen og parcelhuse fra 1960/70’erne, som er i fokus i demonstrationsdelen af projektet. Løsninger til 1960/70’er huse vil i betydelig grad også være relevante til bygninger af anden type og alder.

Rapporten er udarbejdet af projektgruppen bestående af følgende personer:

Henrik Tommerup, DTU Byg

Matilde Grøn, DTU Byg

Søren Peter Bjarløv, DTU Byg

Svend Svendsen, DTU Byg

Gert Jespersen, NCC Construction Denmark A/S

Georg Klingbeil, Saint-Gobain Isover A/S

Gert Christensen, Saint-Gobain Weber A/S

Bjarne Haulrik, Pro Tec Vinduer A/S

Lars S. Sørensen, HT Meter A/S

RESUMÉ

Den store mængde af parcelhuse i Danmark der endnu ikke er renoveret udgør et stort potentiale for energibesparelser. Tilsammen står de for ca. 10% af Danmarks samlede energiforbrug, så det er af stor vigtighed at det gøres lettere at få dette energiforbrug reduceret. Målet med rapporten er at opstille nogle systemløsninger, der vil gøre renoveringsprocessen lettere og mere overskuelig både mht. pris og tid.

Fokus blev lagt på 6 indsatsområder: Ydervæg, Ydervægsfundament, Vinduer og Døre, Tag, Tagfod og Lufttætning.

For ydervæg tages der udgangspunkt i 3 forskellige tunge konstruktioner, der alle er typiske for periodens parcelhuse. Fokus bliver lagt på udvendig efterisolering, da dette giver mulighed for store energibesparelser, ikke er teknisk vanskeligt at udføre, kan give huset et nyt og opdateret udtryk og indeholder gode muligheder for videreudvikling af systemløsninger. Her beskrives også 3 nyudviklede facadebeklædningstyper, der alle er teglbaserede. Formålet med disse nyudviklede beklædninger var at skabe et billigt og vedligeholdelsesfrit alternativ til de eksisterende løsninger, der er meget dyre eller kræver væsentligt mere vedligehold end den teglmur de ofte erstatter. To af løsningerne er specialfremstillede og vil kræve videre arbejde før de vil kunne sælges på markedet, men den tredje er baseret på eksisterende produkter der alle kan købes i butikkerne i dag.

Fundamenterne i parcelhusene er ofte meget dårligt isolerede og leverer en betydelig kuldebro. Her kigges på både vandret og lodret efterisolering af soklen. Den lodrette isolering kræver at der graves ned langs fundamentet, hvilket kan være vanskeligt da dette ikke altid er støbt med en jævn overflade. Den vandrette isolering skal derimod ikke helt så langt ned, men dette er også et problem, da den dermed er mere udsat.

Parcelhusene er typisk oprindeligt bygget med termoruder, med en U-værdi på ca. 2,8 W/m²K. Der er derfor gode muligheder for at opnå store besparelser ved udskiftning af vinduerne eller ruderne. Om det er hele vinduet eller kun ruderne der skal skiftes kommer an på den eksisterende stand og opbygning. Et beregningseksempel viser desuden at når man medtager energitilskuddet der kommer i form af solvarme gennem vinduerne, så vil et vindue have den samme effekt på energibalancen som hvis arealet var dækket af velisoleret væg.

Taget er ofte et oplagt sted at opnå gode energibesparelser. Hvis efterisoleringen udføres i forbindelse med at taget alligevel skal udskiftes er der især gode muligheder for at lave en god efterisolering og en fornuftig lufttætning af taget. Efterisolering af skråtag vil ofte betyde at det er nødvendigt at øge konstruktionen for at få plads.

Tagfoden ligger hvor tag og ydervæg mødes, så den vil blive berørt af de fleste større renoveringsprojekter. I rapporten beskrives en typisk tagfodsopbygning, og der laves en

eksempelberegning af linjetabet for hhv. en original og en efterisoleret opbygning af ydevæg, tag og tagfod.

Der er mange fordele ved at have et tæt hus, idet man blandt andet reducerer varmetabet gennem infiltration, mindsker trækgener og giver bedre mulighed for at kontrollere indeklimaet og dermed lave et behageligt hus. Det er mulig at måle hvor utæt et hus er enten vha. sporgasmåling eller trykprøvning. Ud fra dette kan infiltrationen estimeres. Der er generelt meget store utætheder i parcelhusene, og det er ikke usædvanligt med luftskifter oppe omkring 8 l/s/m² ved trykprøvning ved 50 Pa. Til sammenligning må volumenstrømmen i nye bygninger bygget efter BR 2010 ikke overstige 1,5 l/s pr. m² opvarmet etageareal. Dette niveau eller lavere vil formentlig kunne opnås gennem tætning i forbindelse med renovering. Rapporten gennemgår en række tætningsmetoder fordelt på relevante bygningsdele og konstruktioner.

Rapporten gennemgår desuden fordele og ulemper ved en række isoleringsmaterialer, både almindeligt kendte og anvendte, men også nyere produkter der kan bruges i udviklingen af nye systemløsninger til energirenovering af parcelhuse.

Der foreslås 3 pakkelsninger af tiltag der ofte vil kunne udføres samlet, og kan reducere husets energiforbrug, evt. til nyhus status (BR2010) eller lavenergi status (BR2015). Et beregningseksempel viser at økonomien i BR2010-pakken er fornuftig, når man kigger på energispareprisen (ESP). Her viser det sig at prisen pr. sparet kWh er lavere end hvis man ikke renoverer og dermed skal betale 0,80 kr./kWh for at bruge energien. Her er regnet med en samlet investering på 343.300 kr.

ABSTRACT

The large amount of detached houses in Denmark that has not yet faced renovation presents a large potential for executing energy savings. In total they are responsible for about 10 % of the total energy consumption in Denmark, so it is of the outmost importance that this possibility for energy savings are made available and utilized. The purpose of the report is to present system solutions in order to make the renovation process cheaper and less time consuming.

The report focuses on 6 areas: Outer wall, Foundation below outer wall, Windows and Doors, Roof, Eaves and Air tightening.

The focus for renovation of the outer wall is mostly on external insulation solutions, as this enables large reductions in the energy consumption, is easy to make technically correct, can update the look of the house and presents opportunities for further development of system solutions. In this part 3 new types of façade cladding based on brick tiles is presented. The goal of these is to present a cheap and low maintenance alternative to the existing solutions, which are very expensive or takes a lot more maintenance than the brick wall they often replace. Two of the solutions are new designs and would take some work end development before they are ready to be released, but the last is an off the shelf solution based on existing products that are all already on the marked.

The foundation below the outer wall of these detached houses is often very badly insulated and contributes with a considerable thermal bridge. Solutions for both vertical and horizontal insulation are considered. The vertical insulation requires digging along the existing foundation, which can be difficult as this is rarely made with an even surface. The horizontal insulation does not require going to the same depth, however this is also a weakness as it is more exposed.

The detached houses are typically build with double glazed windows with a U-value of about $2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$. This makes room for large energy improvements by replacing the windows or the glazing. Whether to change the whole window or only the glazing depends on the condition and the buildup. A calculation example shows that when including the energy contribution from solar radiation, the window will have the same effect on the energy balance as a well insulated wall.

The roof is a good place to make energy improvements. If extra insulation is added while replacing the roof it is especially beneficial to insulate and tighten the construction. When adding insulation to a sloped roof it will often be necessary to extend the construction in order to make room.

The eaves are where roof meets façade, so it will often be affected by larger renovation projects. In this report a typical build up of the eaves is described and the linear heat loss is calculated in an example for both the original and the extra insulated solution.

There are many benefits related to having an airtight house, among others a reduced heatloss through infiltration, less draft, and a better control of the indoor environment. It is possible to measure the tightness of a building using either tracer gas or making a pressure test. Based on this, the infiltration can be estimated. Usually there is large leakage from these detached houses and it is not uncommon with air changes about 8 l/s/m² when testing at 50 Pa. In comparison the regulations for new houses say this number must be no more than 1.5 l/s/m² heated area. This level or lower can most likely be reached through tightening in connection with energy renovation. The report describes a number of tightening methods related to the relevant building parts and construction types.

The benefits and disadvantages of a number of insulation materials are listed, concerning both commonly known and well used materials but also new products which can be used in the development of new system solutions for energy renovation.

3 package solutions are created, composed of improvements which can be executed together and reduce the energy consumption, some to new house level (BR2010) or low energy level (BR2015). A calculation example is made based on new house level (BR2010), and shows that the economy is feasible, when looking at the cost of conserved energy (CCE). It shows that the price for saving one kWh through these improvements is lower than if the house wasn't renovated and the energy should be bought for 0,80 Kr./kWh in order to be used. This would take an overall investment of 343.300 kr.

INDHOLD

FORORD.....	I
RESUMÉ.....	II
ABSTRACT	IV
INDHOLD.....	VI
1 INDLEDNING	1
1.1 BAGGRUND	1
1.2 SYSTEMLØSNINGER	2
1.3 FORMÅL	2
1.4 AFGRÆNSNING	3
2 METODE	4
2.1 FOKUS PÅ 6 INDSATSOMRÅDER	4
2.2 KLIMASKÆRMENS VARMETAB.....	5
2.3 ENERGITILSKUD FRA VINDUER OG OVENLYS	6
2.4 ENERGISPAREPRISEN	6
3 INDSATSOMRÅDE 1 - YDERVÆG.....	8
3.1 EKSISTERENDE KONSTRUKTIONER.....	8
3.2 TILTAG TIL REDUKTION AF VARMETAB Gennem YDERVÆG	8
3.2.1 Efterisolering med skeletkonstruktion	9
3.2.2 Efterisolering ved mekanisk fastgørelse af isoleringsbatts	10
3.2.3 Efterisolering med ny skalmur	11
3.2.4 Facadebeklædnings typer	12
3.2.5 Ny teglløsning	14
4 INDSATSOMRÅDE 2 - YDERVÆGSFUNDAMENT	18
4.1 EKSISTERENDE KONSTRUKTIONER.....	18
4.1.1 Historiske indikationer på anvendte konstruktioner.....	18
4.1.2 Eksisterende konstruktioner	19
4.2 TILTAG TIL REDUKTION AF VARMETAB VED YDERVÆGSFUNDAMENT.....	20
4.2.1 Eksisterende efterisoleringsløsninger.....	20
4.2.2 Metode til beregning af fundamentslinjetab.....	22
4.2.3 Beregnet fundamentslinjetab.....	24
4.2.4 Tiltag til reduktion af fundamentslinjetabet	25
4.2.5 Fundamentslinjetab for ”ny blok”	25
5 INDSATSOMRÅDE 3 - VINDUER OG DØRE INKL. SAMLINGER TIL YDERVÆG.....	28
5.1 EKSISTERENDE VINDUER OG DØRE	28
5.2 TILTAG TIL REDUKTION AF VARMETAB Gennem VINDUER OG DØRE	28
5.2.1 Skifte termoruder.....	28
5.2.2 Skifte facadevinduer og -døre	29
5.2.3 Skifte/etablere ovenlys	32
5.2.4 Lystunneller.....	33
5.3 SAMLINGER OMKRING VINDUER OG DØRE	35

5.3.1	Løsningsrum.....	35
6	INDSATSOMRÅDE 4 - TAG	37
6.1	GITTERSPÆR KONSTRUKTION - VANDRET ISOLERING	37
6.1.1	Efterisolering uden tagudskiftning	37
6.1.2	Tagudskiftning og efterisolering	38
6.2	LOFT TIL KIP - SKRÅ ISOLERING.....	38
7	INDSATSOMRÅDE 5 - TAGFOD.....	39
7.1	NY TAGFOD	39
7.1.1	Tagfodsdetalje ved gitterspær og hulmur – almindelige rem.....	39
7.1.2	Eksempel på beregning af linjetabet	40
8	INDSATSOMRÅDE 6 - LUFTTÆTNING.....	44
8.1	MÅLINGER AF KLIMASKÆRMENS LUFTTÆTHED.....	44
8.1.1	Sporgasmålinger.....	44
8.1.2	Trykprøvning.....	45
8.1.3	Infiltrationen.....	45
8.2	LUFTTÆTNINGSMETODER.....	46
8.2.1	Udvendig tætning 1 plan hus med gitterspær.....	47
8.2.2	Udvendig tætning af 1½ plan hus.....	48
8.2.3	Indvendig tætning af ydervægge	48
8.2.4	Indvendig tætning af samlinger omkring vinduer og døre	48
8.2.5	Nyt tæt loft	49
8.2.6	Tætte gennembrydninger for ventilationskanaler	50
8.2.7	Tætning af kold ventileret krybekælder	51
9	ISOLERINGSMATERIALER	53
9.1	MINERALULD	53
9.2	POLYSTYREN (EPS/XPS)	53
9.3	POLYURETHAN (PUR).....	53
9.4	POLYISOCYANURAT (PIR).....	54
9.5	FENOLSKUM (PF)	54
9.6	CELLEGLAS	54
9.7	NYE HØJISOLERENDE MATERIALER	54
9.8	BRAND	55
9.8.1	Klassificering	55
9.8.2	Begrænsninger.....	56
9.9	SAMMENFATNING AF EGENSKABER	57
10	PAKKELØSNINGER.....	58
10.1	BEREGNINGSEKSEMPEL: PAKKE BR2010.....	59
11	KONKLUSION	62
12	REFERENCER	63
BILAG 1: 1960/70'ER PARCELHUSE	1	
	VARMEISOLERINGSSTANDARD	2
	VARMETAB OG FORDELING	2
	PARCELHUSES STØRRELSE, KONSTRUKTIONER OG OPVARMNINGSFORM.....	4

1 INDLEDNING

1.1 Baggrund

Energiforbruget relateret til eksisterende bygninger udgør omkring 40 % af Danmarks energiforbrug. Opvarmning af de ca. 500.000 parcelhuse opført i perioden 1960-80, som udgør ca. 50 % af alle parcelhuse, er alene ansvarlig for ca. 25 % af energiforbruget i bygninger – altså hele 10% af DK's energiforbrug.

Det basale problem er dårligt isolerede klimaskærmskonstruktioner. Husene er opført før oliekriserne og stramninger af bygningsreglementets isoleringskrav, i en tid hvor energi var billig og kravene til klimaskærmen beskedne, så husenes blev født med dårlig energimæssig standard. De er kun i lille omfang blevet energiforbedret i form af f.eks. tillægsisolering på lofter. Adskillige analyser har påvist et stort energibesparelespotentiale i bygninger generelt og især i typiske parcelhuse fra 1960/70'erne, så energieffektive klimaskærmsløsninger har potentiale til markante reduktioner i energiforbruget til opvarmning og dermed en høj CO₂ reduktion.

Parcelhusene har stort varmetab, fordi de er fritliggende etplans huse, og det er særligt ydervæggene og gulve med underliggende kryberum der er dårligt isolerede. Der findes udmærkede efterisoleringsløsninger til ydervægge mv., men der er et stort behov for integrerede løsninger, hvor isolering af klimaskærmens enkelte bygningsdele og lufttætning ses under ét for at sikre en effektiv og sammenhængende isolering uden kuldebroer og et minimalt infiltrationstab. Et lille infiltrationstab er en forudsætning for at luftskiftet kan kontrolleres og dermed en forudsætning for effektiv anvendelse af ventilation med varmegenvinding. Efterisolering og lufttætning af klimaskærmen nedsætter varmebehovet betydeligt, hvilket vil være afgørende for valg af varmekilde og dimensioner på varmeanlægget i forbindelse med renovering af varmeinstallationer. Efterisolering og lufttætning bidrager desuden væsentligt til et bedre indeklima og forbedrer husets vedligeholdelsestilstand og øger dets handelsværdi.

Arkitekturaspektet er vigtigt og nye facader er ikke højt prioriteret sammenlignet med f.eks. nyt bad og køkken (Gram-Hanssen, 2000). Undersøgelsen viser at kun en tredjedel af dem der bor i 1960'erne parcelhuse mener, at deres eget hus er smukt, hvilket indikerer et relativt stort potentiale for udvendig klimaskærmsrenovering. Den viser også at man inspireres af at se på, hvordan andre med tilsvarende huse har løst renoveringsopgaven, og på den måde kan der opstå "modebølger" for, hvordan udvendige klimaskærmsrenoveringer kan udføres inden for et parcelhuskvarter.

Der er altså potentielt et særligt stort marked for renovering af den ca. halve million parcelhuse opført i 1960/70'erne, der efterhånden er blevet 30-50 år gamle og står over for renovering/udskiftning af de basale bygningsdele: tag, vinduer og ydervægge. Husene er

populære og de bærende konstruktioner er generelt i god stand, så nedrivning og nyopførelse er ikke oplagt. Mange husejere foretager i dag ofte renovering etapevis, nye vinduer et år og facaderenovering måske 5 år efter, hvilket ikke er optimalt i forhold til f.eks. vinduesindbygning. Når vinduerne og/eller taget trænger til udskiftning er det måske relevant samtidig at foretage en udvendig efterisolering af facaden med ny regnskærm.

1.2 Systemløsninger

Markedet for renovering af parcelhuse opererer primært med en traditionel håndværksbaseret tilgang med individuelle løsninger. Ambitionen i projektet er at fremme en systemløsnings-tilgang, der dels tillader en industrialisering af den i dag meget håndværksbaserede tilgang, dels fjerner en stor del af den usikkerhed og utryghed, de fleste husejere har overfor dagens organisering af markedet. Systemløsningerne kan sammensættes i pakker, hvorved der også for husejeren skabes et langt bedre overblik over hvilke indsatser, der vil være relevante, og eventuelt hvornår.

Udvikling af systemløsninger vil kunne bidrage afgørende til:

- Mere præcis definition af ydelse og pris
- Enklere udførelse/minimum af belastning ved renovering, hvilket er vigtigt da frygten for et langvarigt, uoverskueligt renoveringsforløb afholder mange husejere fra at begive sig ud i et sådant forløb.
- Mere veldefineret renoveringsforløb - både for udførende og husejer
- Mulighed for større grad af industrialisering af renoveringsforløbet, idet en større del af udførelsen kan ske på værksted, produktelementer kan tildannes på forhånd og processen kan planlægges effektivt med mindst mulig spild af ressourcer og mandskab, hvilket også på sigt vil give billigere løsninger

1.3 Formål

Projektets løsninger skal medvirke til at imødekomme fremtidige skærpede energikrav til eksisterende bygninger. Projektet har fire formål:

- Udvikling af tekniske systemløsninger til energimæssigt vidtgående klimaskærmsrenovering af eksisterende bygninger
- Udvikling af metoder til udarbejdelse af pakkedløsning for det specifikke hus
- Demonstration af tekniske systemløsninger og pakkedløsninger på typiske parcelhuse
- Dokumentation af demo husenes energiforbrug og indeklima mv. - før og efter renovering

Denne delrapport behandler projektets første delmål.

Udviklingen har lagt særlig vægt på at reducere varmetabet og betydningen af kuldebroer, da de relativt set får en større betydning ved øgede isoleringstykkelser. Der har også været fokus på løsninger der bibringer værdi til bolig med hensyn til arkitektur, komfort og indeklima og som kan udføres med en rimelig økonomi.

Den energimæssige målsætning for projektet er, at udviklede isoleringssystemløsninger i kombination med energirigtig energiforsyning og installationer kan bringe eksisterende parcelhuse ned på lavenergibygnings klasse 2015 niveau, som ventes som krav til nye huse fra og med 2015. Opdatering af ældre huses funktion og komfort til nutidige standarder, herunder energiforhold vil udgøre en økonomisk fremtidssikring, som vil have stor betydning for den enkelte husejer og samfundet.

1.4 Afgrænsning

Der er fokus på 60/70'ers parcelhuses klimaskærm, hvor der er udvalgt seks indsatsområder: Lufttætning, fundament, vinduer og døre – inkl. samlinger til ydervæg, tagfod, ydervæg og tag (se afsnit 2.1).

Rapporten beskæftiger sig kun med udvendig efterisolering af ydervægge. Parcelhuse fra nævnte periode tåler typisk et sådan renoveringstiltag og det er den varme- og fugtteknisk bedste løsning, som kan udføres uden væsentlig gene for beboerne.

Rapporten behandler heller ikke terrændæk, da der er meget begrænsede praktiske og økonomiske muligheder for efterisolering. I visse tilfælde kan efterisolering af terrændæk dog komme på tale. Det gælder f.eks. hvis terrændækket er beskadiget, som følge af brug af slagger som kapillarbrydende lag, vandskade opstået som følge af utætte og indstøbte varmerør i betondækpladen eller hvis gulvbelægningen skal skiftes. Hvis det bliver aktuelt med fjernelse af det eksisterende terrændæk, kan der etableres en ny højisoleret konstruktion efter samme retningslinjer som for nye huse. Ændring til terrændæk kan også være relevant ved traditionelle kolde krybekældre, hvor det måske er eneste mulighed for at forbedre konstruktionen.

Rapporten har ikke fokus på energitiltag vedrørende energiforsyning, varmeinstallationer og ventilation, som dog udgør vigtige energibesparende elementer. Derfor omtales de kort og primært i forhold til sammenhæng med klimaskærmsrenovering med tillægisolering.

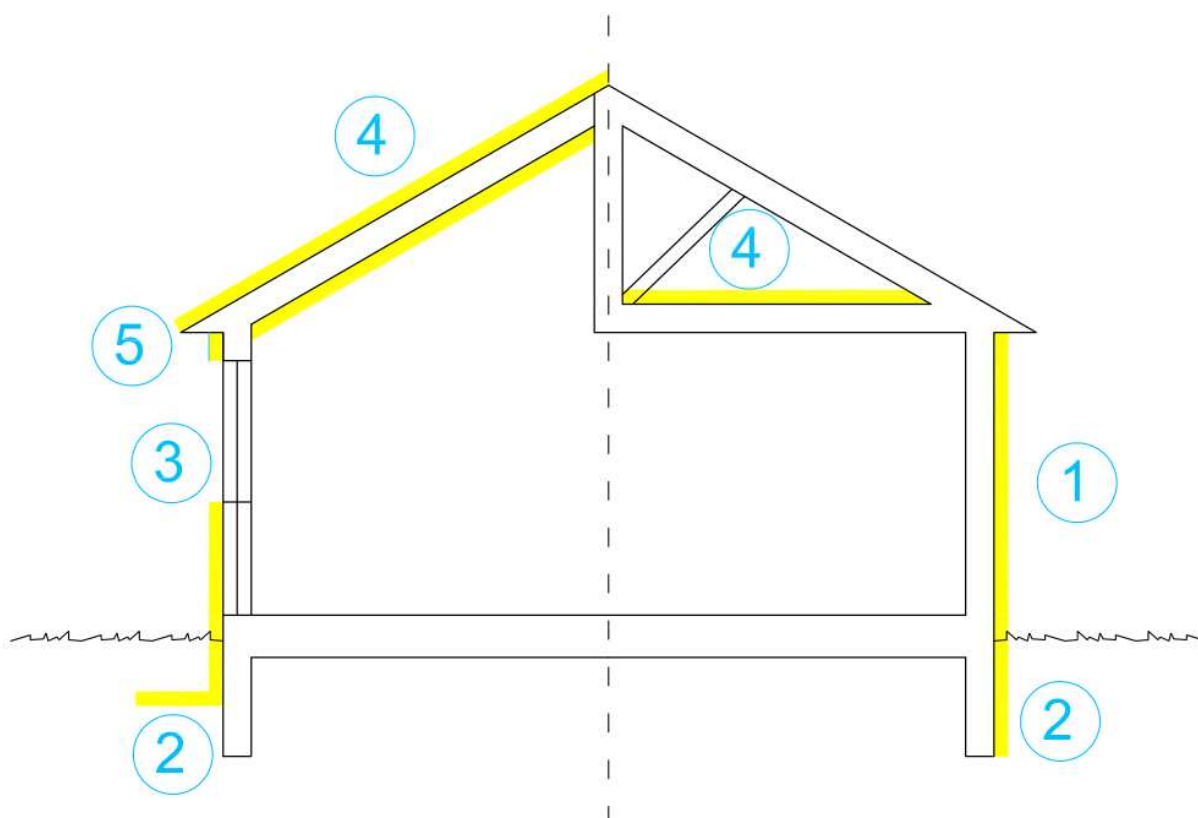
2 METODE

I det følgende vil rapportens fokusområder blive udspecificeret, og metoder til beregning af varmetab samt energitilskud vil blive gennemgået. Herudover beskrives energispareprisen, der er en måde at udregne og sammenligne energibesparelser vha. økonomi.

2.1 Fokus på 6 indsatsområder

Projektet omhandler primært forbedringer af klimaskærmen med det formål at nedsætte husets varmetab og dermed energiforbruget. Klimaskærmen er blevet opdelt i 6 indsatsområder, se Figur 1, der alle vil blive bearbejdet i rapporten.

- Ydervæg
- Ydervægsfundament
- Vinduer og døre – inkl. samlinger til ydervæg
- Tag
- Tagfod
- Lufttætning



Figur 1. Skitse af eksisterende parcelhus hvor 5 af de 6 indsatsområder vedr. klimaskærmen er markeret. Det 6. lufttætning er relevant for alle dele af klimaskærmen.

2.2 Klimaskærmens varmetab

For hver enkelt bygningsdel undersøges forskellige renoveringsløsninger og efterisoleringsstykkelser. U-værdierne for de enkelte isoleringsniveauer bestemmes, ligesom betydningen af de vigtigste kuldebroer bestemmes i form af primært linjetab/ Ψ -værdier på baggrund af detaljerede varmetabsberegninger.

En kuldebros Ψ -værdi defineres i DS418: Beregning af bygningers varmetab, som effekten af de 2-dimensionale varmestrømme. Varmetabsberegninger i dette projekt følger som udgangspunkt beregningsreglerne i DS418. Der afviges dog fra de normale beregningsmetoder ved at regne med kuldebrovirkningen i samlingen mellem ydervæg og tag (tagfod). Som en konsekvens heraf regnes der med indvendige mål ved bestemmelse af transmissionsareal for ydervægge og tag.

Af hensyn til behandlingen af hver bygningsdel, er det nødvendigt at fordele linjetabet i samlingerne. Halvdelen af linjetabet ved tagfoden medregnes under ydervæggen, mens den anden halvdel medregnes under tagkonstruktionen. Da væg og fundament hænger sammen og linjetabet i væg-gulv samlingen mest afhænger af fundamentets udformning tillægges væggen hele fundamentslinjetabet. Der regnes med udvendig mål ved bestemmelse af fundamentslængden.

Ved bestemmelse af de vigtigste kuldebroers bidrag til U-værdien anvendes det typiske hus i bilag 1 til at kvantificere forholdet mellem linjetabslængden og konstruktionsdelens areal. U-værdien inklusiv linjetabstillæg kan benævnes den effektive U-værdi. Der anvendes afrundede værdier, hvor der er nået frem til følgende tillæg til U-værdien:

Ydervæg:

$$0,67 \frac{m}{m^2} \cdot \Psi_{fundament} + 0,75 \frac{m}{m^2} \cdot \Psi_{vinduestilslutning} + 0,5 \cdot 0,67 \frac{m}{m^2} \cdot \Psi_{tagfod}$$

Loftskonstruktion:

$$0,5 \cdot 0,4 \frac{m}{m^2} \cdot \Psi_{tagfod}$$

Effekten af spærfor og murbindere medregnes i de relevante fladers U-værdi. Vægtningen af kuldebroernes betydning afhænger naturligvis af husets geometri. Haves et konkret hus hvor metoden skal anvendes, er det relativt nemt ud fra en anden vægtning at bestemme en ny effektiv U-værdi for det pågældende tilfælde.

Transmissionstabet (varmetabet) i kWh/m²/år bestemmes ud fra produktet af den effektive U-værdi og det årlige gradtimer, hvor antallet af gradtimer er baseret på en indetemperatur på 20°C. Data for udetemperaturen i fyringssæsonen er hentet fra det danske design referenceår.

DRY. Det årlige gradtimetal er 90.000 Kh. Gradtimetallet for terrændæk uden gulvvarme kan som standard beregnes med en temperaturfaktor på 0,7, dvs. varmetabet reduceres 30% i forhold til ydervæg og tag. Effekten af isoleringstiltag afhænger af vinduesareal og -orientering samt bygningens varmekapacitet samt varmeanlæggets effektivitet. Det antages at en ændring i transmissionstabet slår igennem med en faktor 1 på bruttoenergiforbruget til opvarmning.

2.3 Energitilskud fra vinduer og ovenlys

Vinduer og ovenlys er transparente bygningsdele, så udover et varmetab vil de også bidrage med et tilskud af solvarme. Der tages højde for denne effekt ved at anvende formler for deres energitilskud som angivet i bygningsreglementet, bilag 6 (BR2010):

Facadevinduer, baseret på et 1,23 x 1,48 referencevindue:

$$E_{ref} = I \cdot g_w - G \cdot U_w = 196,4 \cdot g_w - 90,36 \cdot U_w$$

Ovenlysvinduer, baseret på et 1,23 x 1,48 referencevindue, 45° taghældning:

$$E_{ref} = 345 \cdot g_w - 90,36 \cdot U_w$$

Hvor:

I	Solindfald korregeret for g-værdiens afhængighed af indfaldsvinklen.
g_w	Total solenergitransmittans for vinduet.
G	Gradtimer i fyringssæsonen baseret på en indetemperatur på 20°C
U_w	Varmetransmissionskoefficient for vinduet

Solindfaldet I og antallet af gradtimer G i løbet af fyringssæsonen er bestemt ud fra referenceåret DRY. Solindfaldet afhænger af vinduernes orientering og der er derfor benyttet et enfamiliehus som reference med følgende vinduesfordeling: Nord: 26%; Syd: 41%; Øst/vest: 33%.

2.4 Energispareprisen

Energispareprisen (ESP) er prisen for at spare en kWh ved et givent energisparetiltag. Metoden kan bruges til f.eks. at finde det totaløkonomisk optimale isoleringsniveau i en bygningsdel.

I forhold til traditionelle metoder som simpel tilbagebetalingstid er fordelene ved energispareprisen følgende:

- Kan sammenlignes direkte med aktuel energipris (energisparepris < energipris = lønsomt)
- Nemmere at vurdere økonomi ift. energipriser.

- Godt redskab til at rangordne enkelttiltag af vidt forskellig karakter i forhold til deres totaløkonomi
- Enkelttiltag kan sættes sammen til optimale kombinationer med samme energisparepris, hvorved man har drevet de enkelte tiltag lige langt og dermed optimalt, og som kan sammenlignes med energirammer.

Energispareprisen (ESP) beregnes ud fra følgende formel:

$$ESP = \frac{\frac{n}{n_t} \cdot a(n, r) \cdot I_{\text{tiltag}} + \Delta VO_{\text{årlig}}}{\Delta E_{\text{årlig}} - 2,5 \cdot \Delta E_{\text{drift, el, årlig}}}$$

Hvor:

n	Økonomisk levetid (30 år)
n_t	Teknisk levetid (år). Den beregningsmæssige tekniske levetid i henhold til Bygningsreglementet, evt. en anden (længere) levetid hvis der er gode argumenter for det.
$a(n, r)$	Annuitetsfaktoren (-). $a(n, r) = r / (1 - (1 - r)^n)$, hvor r er realrenten. Annuitetsfaktoren bruges til at omregne investeringen til summen af årlige afdrag og renter.
I_{tiltag}	Investeringen eller merinvesteringen (kr/m ²) – denne kan "renses" for renoveringsdelen ved at multiplicere med en energirenoveringsfaktor (0-1), som er defineret som den andel af anlægsudgifterne som kan tilskrives energirenovering, svarende til de totale anlægsudgifter fratrasket udgifter der alligevel skal afholdes, når arbejdet er led i en renovering eller udskiftning. Hvis der er tale om renoveringstiltag alene for at opnå en energibesparelse sættes energirenoveringsfaktoren til 1.
$\Delta E_{\text{årlig}}$	Årlig energibesparelse (kWh/m ² /år).
$\Delta VO_{\text{årlig}}$	Årlige ekstra omkostninger til vedligeholdelse (kr/m ²).
$\Delta E_{\text{drift, el, årlig}}$	Årligt ekstra elforbrug (kWh/m ² /år) – kun aktuelt for f.eks. ventilation med varmegenvinding, hvor energibesparelsen opnås på bekostning af et øget elforbrug.

Metodemæssigt vil det være mest korrekt at basere sig på beregning af den marginale energisparepris (løbende reference frem for fast reference i form af f.eks. eksisterende isoleringsniveau) ved optimering af f.eks. efterisoleringstykkelsen for en ydervæg, hvilket kræver analyse af isoleringstykkelser med relativt korte intervaller.

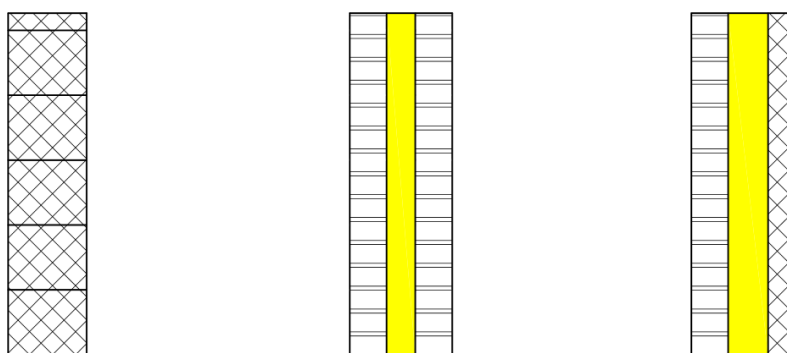
Energiprisen bør fastsættes som en gennemsnitspris over beregningsperioden. World Energy Outlook er nok den bedste kilde til vurderinger af den langsigtede energipris. I den seneste udgave angav man en oliepris på 110 \$/tønne i 2050 i nutidskroner.

3 INDATSOMRÅDE 1 - YDERVÆG

3.1 Eksisterende konstruktioner

Husene fra perioden er typisk opført i tegl og/eller porebetonblokke. Her beskrives 3 typiske ydervægskonstruktioner, se Figur 2:

- Y1: Murværk af 23/19 cm massive porebetonblokke
- Y2: 30 cm isoleret hul mur med for- og bagmur i teglsten
- Y3: 30 cm isoleret hul mur med formur i teglsten og bagmur i porebeton



Figur 2. Tre typiske ydervægsopbygninger i 60/70'ers parcelhuse (Y1, Y2 og Y3).

Type Y1 er nævnt specifikt i bygningsreglementet fra 1961 (BR61), idet der står at 23 cm 700 kg/m³ letbeton opfylder U-værdi kravet på 1,0 W/m²K. En ikke ringe andel er dog udført i 19 cm tykkelse og lavere densitet/varmeledningsevne.

Type Y2 er en såkaldt fuldmuret ydervæg med puds indvendigt. Der forudsættes isolering i form af 7,5 cm mineraluld. En variant af denne type er murværk i kalksandsten. Varmeledningsevnen for kalksandsten er omtrent en faktor 2 større end for teglsten ved typisk densitet. Kalksandsten i bagmuren vil derfor alt andet lige medføre et større linjetab.

Type Y3 er i stor udstrækning udført som etagehøje elementer i 7,5 cm tykkelse. Der forudsættes isolering i form af 12 cm mineraluld. Porebeton i bagmuren har en positiv effekt på linjetab sammenlignet med teglsten. De etagehøje elementer har alternativt været udført i letklinkerbeton med varmeledningsevne cirka som teglsten.

3.2 Tiltag til reduktion af varmetab gennem ydervæg

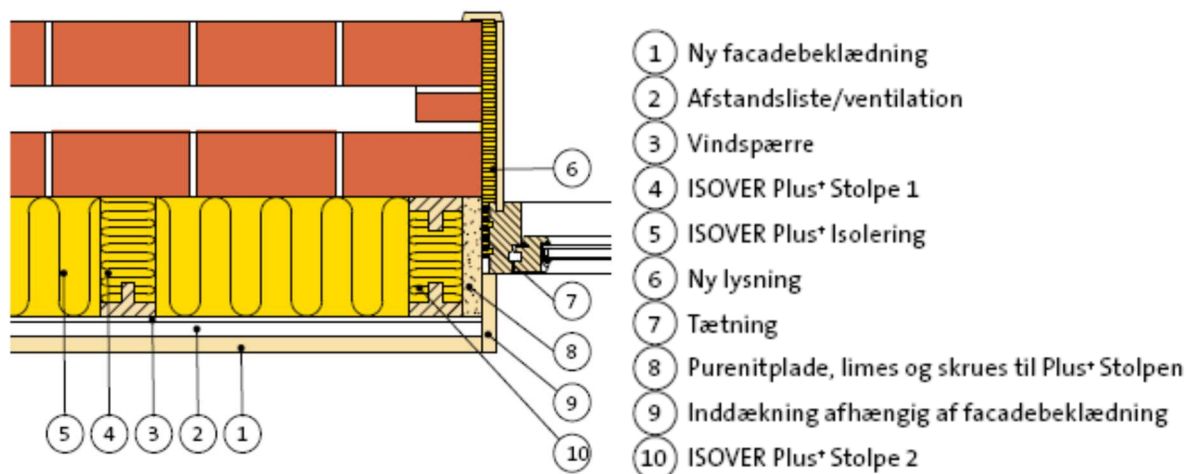
I de følgende afsnit vil forskellige løsninger til efterisolering af ydervæg blive gennemgået. Når en væg skal efterisoleres er der 3 overordnede løsningsmuligheder: indvendig isolering,

hulmursisolering og udvendig isolering. Den indvendige isolering kan potentielt give fugtproblemer, den tager af pladsen inde i huset og den giver kuldebroer der hvor indre konstruktioner møder klimaskærmen. Dette er derfor kun en løsning man bør bruge hvis andre løsninger ikke er mulige, f.eks. hvis huset har en bevaringsværdig facade. Hulmursisolering vil næsten altid være en god ide, og giver sjældent anledning til problemer. Her er udfordringen dog at man er pladsmæssigt begrænset, ofte til under 10 cm, hvilket sætter en grænse for hvor stor en energibesparelse man kan opnå. I denne rapport vil vi udelukkende beskæftige os med udvendig efterisolering, da dette er en god løsning til mange af husene fra perioden, idet det kan give huset et arkitektonisk løft, det kan potentielt give en stor energibesparelse og der er mulighed for yderligere udvikling af systemløsninger på området.

3.2.1 Efterisolering med skeletkonstruktion

Efterisolering i skeletkonstruktion foregår traditionelt ved anvendelse af massive træstolper eller f.eks. slidsede stålprofiler.

Isover har udviklet et system med et minimum af kuldebroer i form af stolper af trykfast glasuld med én eller to kanter af profileret træ (Isover Plus System), som fastgøres til bærende underlag i form af den eksisterende ydervæg. Mellem stolperne udfyldes med almindelig blød mineraluld (lambda 32, 34 eller 37). Systemløsningen tilbydes i to standardtykkelser på hhv. 195 og 290 mm. Hvis stolperne ikke er understøttede eller den samlede væghøjde er større end 3 m kan anvendes særlige U bøjler til bæringen.



Figur 3. Detalje ved vinduer og døre. Stolper med to kanter af profileret træ anvendes på sokkel og ved vinduer og døre. Kilde: Isover

Isover Plus Systemet er udviklet til facadebeklædningsløsninger med ventileret luftspalte i form af træ, plademateriale og pudsløsninger. Der er tale om en mekanisk robust og fugtsikker løsning inkl. nem vinduesmontering i passende plade i vinduesfalsen, der limes og skrues fast til stolperne (se Figur 3). Ofte indgår udskiftning af vinduer og døre i samlet facade pakkelse. Processen er at montere de nye vinduer og døre i forbindelse med

facadeisoleringen og til slut at demontere de eksisterende vinduer/døre indvendig fra og etablere nye lysningsplader mellem de nye vinduer og indvendig mur.

3.2.1.1 Priseksempel

På baggrund af erfaringer fra udbud af facadearbejder baseret på anvendelse af Isover Plus Systemet (februar 2011), er der i Tabel 1 opstillet priseksempler med runde tal, på renovering af et typisk parcelhus.

Tabel 1. Priser for renovering af typisk parcelhus med Isover Plus systemet, angivet i runde tal baseret på erfaringer fra udbud (februar 2011). Parcelhuset er 140 m², har 10 vinduer, 5 døre, ca. 100 m² facade og ca. 55 m sokkel.

ØKONOMISK EKSEMPEL PÅ BRUG AF ISOVER PLUS SYSTEMET	
Arbejde/materiale	Udgift, inkl. moms Kr.
Isover Plus 195 mm inkl. Fundament og regnskærm ¹	300.000
Tillæg ved 290 mm Plus Stolpe	12.500
Pro Tec lavenergivinduer inkl. montering	125.000
Flytning af eksisterende vinduer	56.500
Nye lysninger og vinduesplader samt malerarbejde	40.000
Demontering af eksisterende vinduer/døre	14.000
Udlusning af gulv ved yderdøre	17.000

¹ Ivarsson Smooth board 10 x 190 x 3000 mm

Isover Plus System med pudsløsning er lidt dyrere end mekaniske fastholdte isoleringsbatts med puds, da den plade der skal pudses på er ret dyr.

Hvis der vælges en pakkeløsning inkl. nye vinduer og montering, skal der ikke regnes med pris for flytning af eksisterende vinduer. Den samlede pris er ca. kr. 500.000. Hvis eksisterende vinduer flyttes, opnås der en besparelse på ca. kr. 70.000. Med andre ord kan man få nye lavenergivinduer for kun kr. 70.000,- ekstra.

3.2.2 Efterisolering ved mekanisk fastgørelse af isoleringsbatts

Ved efterisolering med mekanisk fastgørelse af isoleringsbatts er der mulighed for at benytte enten batts af mineraluld eller celleplast.

3.2.2.1 Isoleringsbatts af mineraluld

Isoleringssystemer med mekanisk fastholdelse af isoleringsbatts er traditionelt baseret på hårde isoleringsbatts af mineraluld fastgjort til den eksisterende ydervæg ved klæbning og/eller dybling. Isover Facadekoncept er et eksempel på efterisolering med mineraluld. Der

anvendes pladeisolering (lambda 37-38) og dybling, hvor mekanisk fastholdelse er nødvendig. Der anvendes hård lamelisolering (lambda 40) der opklæbes, hvis underlaget er rent og stærkt. Der afsluttes med en facadepudsløsning og opereres med isoleringstykker på op til maksimalt 200 mm.

3.2.2.2 Isoleringsbatts af celleplast

Det forventes i nær fremtid indført nye regler, som på enfamiliehusområdet vil tillade anvendelse af EPS og andre celleplast materiale som f.eks. PIR, hvor sidstnævnte har bedre isoleringsegenskaber end den traditionelle mineraluld. Tilladelsen afventer tilbundsgående undersøgelser af om skumisolering forringer brandsikkerheden. Isoleringssystemet Weber.therm Plus Ultra er baseret på materialet fenolskum (PF), som er det celleplast materiale der har den bedste isoleringsevne (jf. kapitel om isoleringsmaterialer). Materialet opfylder brandklasse B-s1,d0, og da der ikke stilles yderligere krav ud fra brandhensyn til materialer i klasse A1, A2 eller B-s1,d0, så vil det kunne anvendes uden yderligere brandmæssige begrænsninger til efterisolering af enfamiliehuse. Det koster lambda-mæssigt cirka det samme som mineraluld, men har umiddelbart fordele i form af nemmere sammenbygning med eksisterende tagudhæng og vinduer mv.

Celleplast isolering med puds eller anden brandsikker belægning, vil være relevant ved udvendig efterisolering på mineralske ydervægskonstruktioner. Når det drejer sig om udvendig efterisolering af ydervægge med organiske materialer (f.eks. træskeletvægge) er der i Sverige ført bevis for at anvendelse af tætte isoleringsmaterialer som EPS eller lignende og puds direkte på materialet (ét-trins tætning) kan give markante problemer med råd og svamp, hvis fugt trænger gennem f.eks. revner i puds og ind til den vindtætte afdækning af trækonstruktionen, idet udtørring er besværliggjort af diffusionsmodstanden i celleplasten. På trækonstruktioner vil det derfor være fornuftigt at anvende en diffusionsåben mineraluld eller andre diffusionsåbne materialer eller der kan anvendes to-trins tætning i form af en ventileret luftspalte bag facadebelægningen, men det er dyrt.

3.2.3 Efterisolering med ny skalmur

Facadeisolering med skalmur er for husejeren der ønsker en facadeisolering, men også de kvaliteter som kun en traditionel skalmur kan præstere, selv om f.eks. skærmtegl til en vis grad kan opfylde ønske om en robust og vedligeholdelsesfri facade. Ulempen ved løsningen i forhold til andre isoleringssystemer, er at skalmuren kræver en bæring/fundament og at der med større konstruktionstykkelser alt andet lige vil være mere behov for tiltag ved tagudhæng og vinduer mv.

3.2.4 Facadebeklædningstyper

Der findes en række forskellige facadebeklædningstyper og bæresystemer der kan benyttes i forbindelse med efterisolering af facaden. I dette afsnit vil en række af disse produkter blive beskrevet og deres anvendelighed på et parcelhus vil blive vurderet.

3.2.4.1 Skærmtegl

Skærmtegl er tynde skaller af brændt ler der findes i mange størrelser og farver. Disse opsættes på et skelet af enten stål eller træ. De monteres ofte uden overlap på lige rækker, og uden synlige beslag eller skruer. Skærmtegl har mange af de samme egenskaber som en klassisk muret teglvæg, idet materialet er nærmest vedligeholdelsesfrit og har en lang teknisk levetid på ca. 50 år. Herudover er det ikke nødvendigt at udbygge fundamentet i forbindelse med at der påføres ekstra isolering beklædt med skærmtegl.

Brugen af skærmtegl i forbindelse med renovering af parcelhuse er ikke så udbredt. Dette kan skyldes at folk ikke er vant til at se teglene på mindre bygninger, men ofte forbinder dem med noget mere industrielt. Herudover er de rimeligt kostbare, til dels pga. systemet de hænges op på.



Figur 4 – Eksempel på brug af skærmtegl på en mindre bygning i forbindelse med en renovering.

Kilde: <http://byggeri-arkitektur.dk/skana#.VMo45EeG9sc>

3.2.4.2 Fibercement – eternitplader

Fibercement beklædning kommer i mange udformninger såsom brædder og plader, og bliver normalt monteret med synlige skruer eller beslag. Pladerne monteres på en konstruktion af stål eller træ. Pladerne er støbt af cement med indlagte fibre der gør materialet både let og

stærkt. Det er modstandsdygtigt overfor vind og vejr og har en lang teknisk levetid med et meget lavt vedligeholdelsesbehov. Ligesom det er tilfældet med skærmtegl anvendes fibercementplader kun i lille grad i forbindelse med parcelhuse. Materialet er billigere end skærmtegl, men har et mere industrielt udseende og et begrænset farveudvalg.



Figur 5 - Eksempel på brug af fibercement på et parcelhus i forbindelse med en renovering.

Kilde: <http://www.danskeboligarkitekter.dk/soeg/projekt/vis/lys-til-60er-parcelhus/#.VMo5eEeG9sc>

3.2.4.3 Naturskifer

Skifer er en naturligt forekommende stenart, i varierende nuancer af mørk grå. Materialet har traditionelt været benyttet som tagbeklædning, men anvendes i stigende grad som facadebeklædning. Skiferstenene monteres enten fladt eller klinklagt på en ventileret konstruktion af lægter. På grund af det begrænsede udvalg i farver kan skifer ikke tilbyde så mange forskellige udtryk, til gengæld har det en fordel idet det er et meget holdbart kvalitetsmateriale.



Figur 6 – Eksempel på brug af naturskifer som facadebeklædning.

Kilde: <http://www.bygogbolig.dk/artikel/naturskifer-paa-facaden/>

3.2.5 Ny teglløsning

Baseret på de udfordringer der kan være ved eksisterende løsninger er der forsøgt udviklet nye løsninger til facadebeklædning (Johannesen, 2013). Målsætningen er at den blandt andet skal:

- Kunne kombineres med ekstern isolering, og således reducere det totale varmetab og mængden af kuldebroer.
- Skal være nogenlunde vedligeholdelsesfri, så en husejer der vælger denne løsning frem for deres eksisterende teglvæg ikke ender med et større vedligeholdelsesarbejde end før.
- Prisen skal være lav, så det ikke bliver en uoverskuelig udgift for husejeren og så produktet kan konkurrere med andre produkter på markedet.
- Produktet skal være let at montere, så det kan udføres hurtigt af professionelle eller som gør-det-selv arbejde af husejeren selv.

3.2.5.1 Pladeløsning af fiberarmeret beton

For at komme tæt på det udtryk og de kvaliteter der er i den klassiske teglmur, er der blevet udviklet et system hvor teglskaller indstøbes i fiberarmeret beton, der fra fronten vil ligne klassiske fuger. Pladerne har en størrelse på 1200x400mm, der passer med 5x6 sten i fliseforbandt. Samlingerne er så vidt muligt lavet så de vil ligne de resterende fuger. Herudover er de vandrette samlinger trukket lidt tilbage for at gøre plads til et beskyttet beslag, der kan holde pladen på plads, se Figur 7. Illustration af pladetegløsningen som den

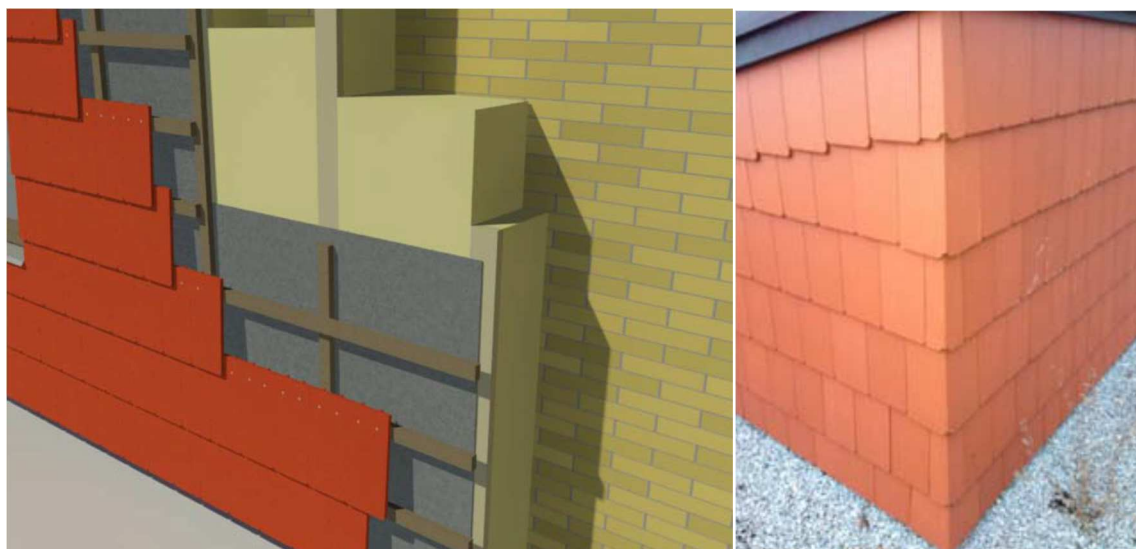
ville kunne udføres på en teglvæg med ekstern isolering. Beslaget der bruges til at holde teglpladerne fast.Figur 7.



Figur 7. Illustration af pladetegl-løsningen som den ville kunne udføres på en teglvæg med ekstern isolering. Beslaget der bruges til at holde teglpladerne fast.

3.2.5.2 "Off the shelf" løsning

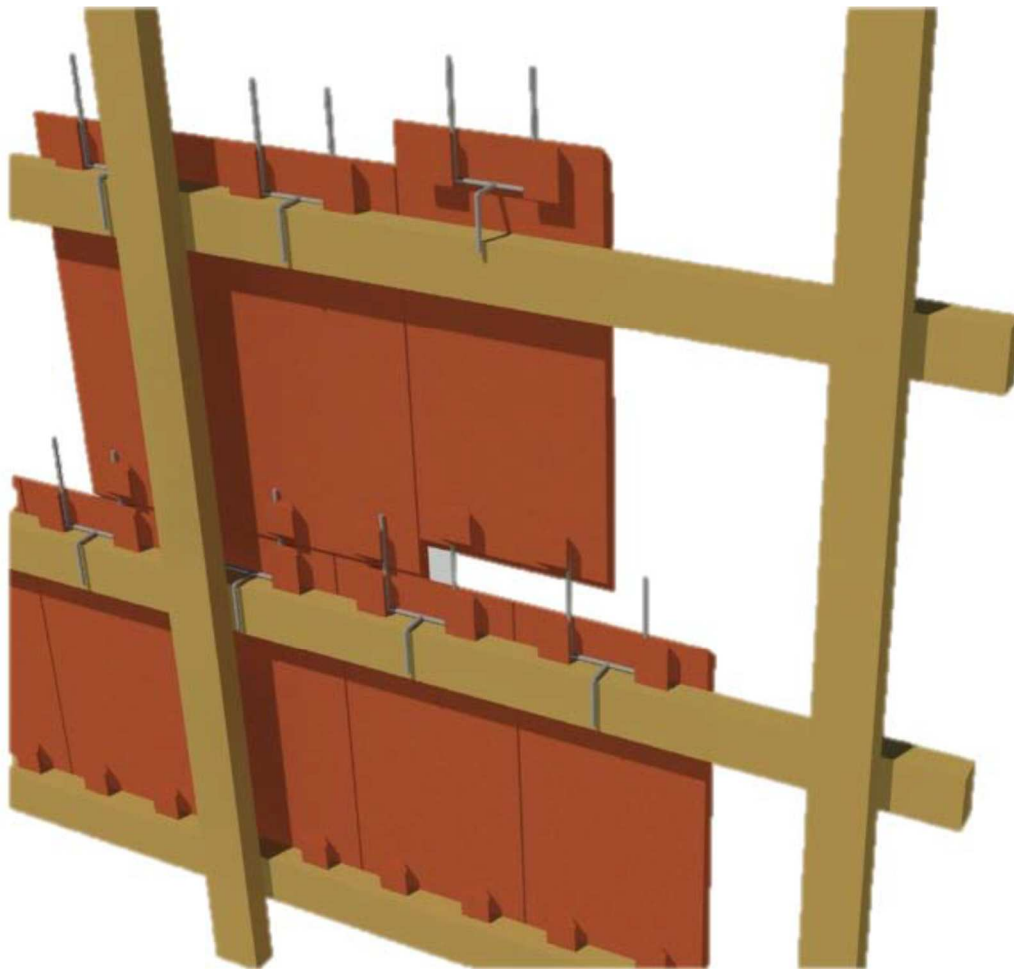
En anden mulig systemløsning er at udvikle et brugbart system baseret på produkter der allerede er på markedet. Her tages udgangspunkt i bæverhaletegl, da disse er en del billigere end skærmtegl, der sædvanligvis benyttes til facadebeklædning. Normalt bruges bæverhaler som tagbeklædning, hvor de klinklægges. Ved at lave overlappet mindre bliver tykkelsen af beklædningen reduceret og kvadratmeterprisen bliver mindre. På denne måde kan man lave en meget holdbar beklædning til en relativt lav pris, se Figur 8.



Figur 8. Illustration og foto af bæverhale-løsningen.

3.2.5.3 Modificeret skærmtegl med ståløjle og tryk imprægneret træ

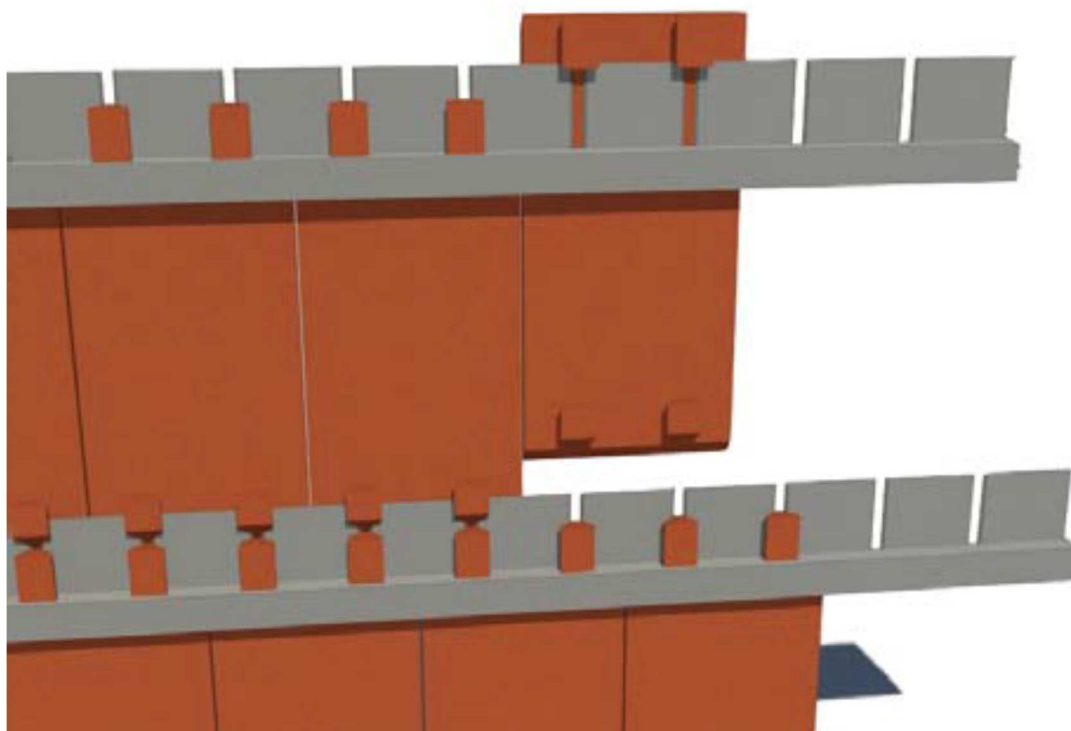
Denne løsning er en videreudvikling af bæverhalen, så det bliver muligt at lægge den plant i stedet for i klink. Der laves et skråt snit i top og bund, for at forhindre vand i at løbe ind bag beklædningen og give et mere lukket udtryk. Der er udviklet en galvaniseret ståløjle, der kan holde på 2-3 tegl, alt efter forbandt, se Figur 9.



Figur 9. Illustration af den modificerede teglløsning med trykimprægneret træ.

3.2.5.4 Modificeret skærmtegl med monteringsprofil

Da arbejdslønnen er en betydelig post i den samlede investering er der blevet kigget på om arbejdstiden kunne reduceres ved at lave en mere industrialiseret løsning. Her er der blevet udviklet et profil, der ville kunne erstatte både ståløjle og forskallingsbrædder, se Figur 10. Her skal der dog arbejdes videre med hvilket materiale man ville vælge at benytte. Galvaniseret stål vil være sårbart ved tilpasning da beskyttelsen brydes, hvor aluminium eller rustfrit syrefast stål muligvis vil være en bedre løsning. Brugen af profiler vil dog øge prisen for den samlede løsning, men dette kan muligvis opvejes af lavere monteringsudgifter.



Figur 10. Illustration af den udviklede teglløsning med stålprofil.

4 INDSATSOMRÅDE 2 - YDERVÆGSFUNDAMENT

Eksisterende ydervægsfundamenter er typiske udført i et stærkt varmeledende materiale som beton eller beton kombineret med én eller flere blokke af letklinkerbeton i soklen. Hvis der er letklinkerbeton i soklen vil det reducere varmestrømmen indefra betydeligt, i forhold til hvis også soklen var støbt i beton. Eksisterende terrændæk er typisk sparsomt isoleret, men i nogle tilfælde er den sparsomme isolering placeret over betonpladen, hvilket hjælper på at begrænse varmestrømmen via fundamentet.

Efterisoleringstiltag kan reducere fundamentslinjetabet betydeligt, men det vil antage et niveau, der er langt dårligere end for nye huse medmindre der gøres særlige tiltag. I dette kapitel redegøres for fundamentslinjetabet for typiske konstruktioner og efterisolerede konstruktioner.

4.1 Eksisterende konstruktioner

4.1.1 Historiske indikationer på anvendte konstruktioner

Branchevejledninger, SBI-anvisninger og lignende indikerer at der i huse fra 1960'erne typisk ikke blev anvendt kuldebrosisolering i fundamenterne og formentlig heller ikke i de fleste huse fra før 1977. Selv i 1980'erne blev en del huse opført med kun én letklinkerbetonblok under ydervæggen.

4.1.1.1 Fundament

Ud fra brochurer fra "LECA Byggeinformation" kan man se at fundamentsløsninger først blev behandlet fra 1970. Frem til 1974 foreslog de en blok støbt ind i bagmuren, og fra 1974-87 viste de også muligheden for to blokke under hele ydermuren, se Figur 11. Herefter blev der udelukkende vist to blokke. Fra 1977 blev begrebet "den lune ramme" med 2 blokke under ydervæggen indført som et forslag for at reducere isoleringen af randzonen i terrændækket. Fra 1986 blev "Leca termblokkene" indført, men blev kun solgt i meget begrænset omfang i de første mange år. Først i 1989 kom den første anvisning, hvor fundamenter indgår i overskriften på anvisningen sammen med terrændæk.

4.1.1.2 Terrændæk

En konstruktion som letbeton udstøbt eller i blokke (på drænlæg), som en kombination af klaplæg og varmeisolering, har haft en vis udbredelse. Letbeton som gulvisolering udstøbt f.eks. over klaplaget har også været brugt. Desuden har løse letklinker været anvendt som kombination af drænlæg og isolering. Der findes ikke umiddelbart viden om hvor omfattende anvendelsen af letbeton til isolering har været i forhold til andre isoleringsprodukter, eller hvordan fordelingen af de nævnte løsninger har været.

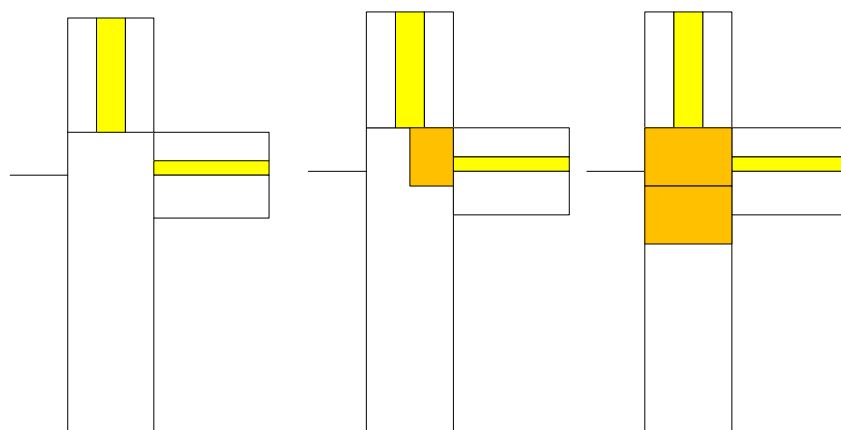
4.1.2 Eksisterende konstruktioner

Udover selve ydervægsfundamentet, har også opbygningen af terrændæk og ydervægge stor betydning for varmetabet igennem fundamentet. I det følgende er defineret forskellige typer eksisterende ydervægsfundamenter og terrændæk, der typisk forefindes i parcelhuse fra 60/70'erne.

4.1.2.1 Fundamenter

Typiske fundamenter uden og med letklinkerblokke i soklen (se Figur 11):

- F1: Beton
- F2: Beton m 1 letklinker blok (bxh=15x20cm) under bagmur i højde på 20cm
- F3: Beton med 2 letklinker blokke (bxh=30x20cm) under hele ydermuren i højde på 40cm



Figur 11. Tre typiske fundamenter i 60/70'ere parcelhuse (F1, F2 og F3).

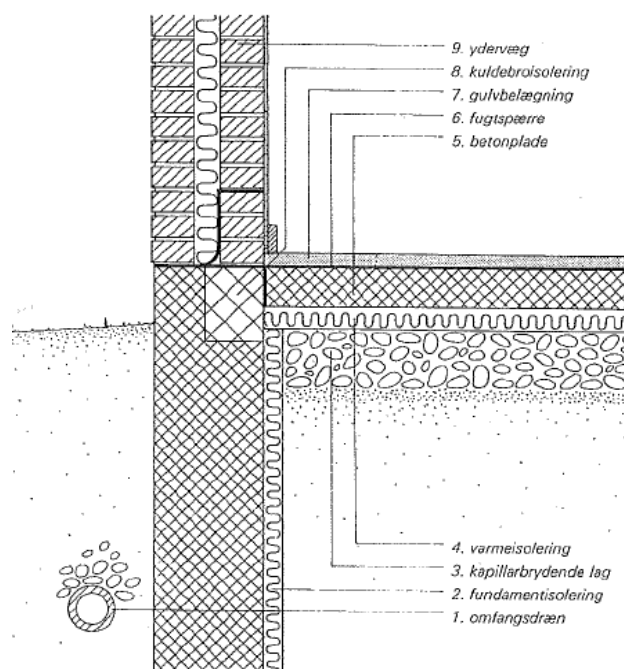
Det antages at fundamenter er ført til frostfri dybde 90 cm under terræn, er 30 cm brede under jordoverfladen, at fundamentoversiden ligger 15 cm over terræn, at betonpladen er 10 cm tyk og at oversiden flugter med overside fundament.

4.1.2.2 Terrændæk

Typiske terrændæk:

- T1: Betondækplade og med 50 mm isolering under betondækpladen
- T2: Betondækplade med 50 mm isolering over betonplade og trægulv på strøer

Det vurderes ud fra krav i Bygningsreglementet at de fleste terrændæk i periodens huse er udført med 50 mm isolering i randfeltet (1 m) og 30 mm i resten af terrændækket. Som alternativ til den ekstra isoleringstykkelse i randfeltet tyder det på at en løsning med 20 mm stive mineralulds- eller polystyrenplader ført mindst 1 m ned under gulvoverfladen har været anvendt, men det var formentlig ikke almindeligt (se Figur 12).



Figur 12. Ydervægsfundament med kuldebroisolering i form én letklinkerblok under bagmuren og isolering indvendigt på fundamentet i stedet for ekstra isolering i terrændækkets randfelt. (Christensen, 1971)

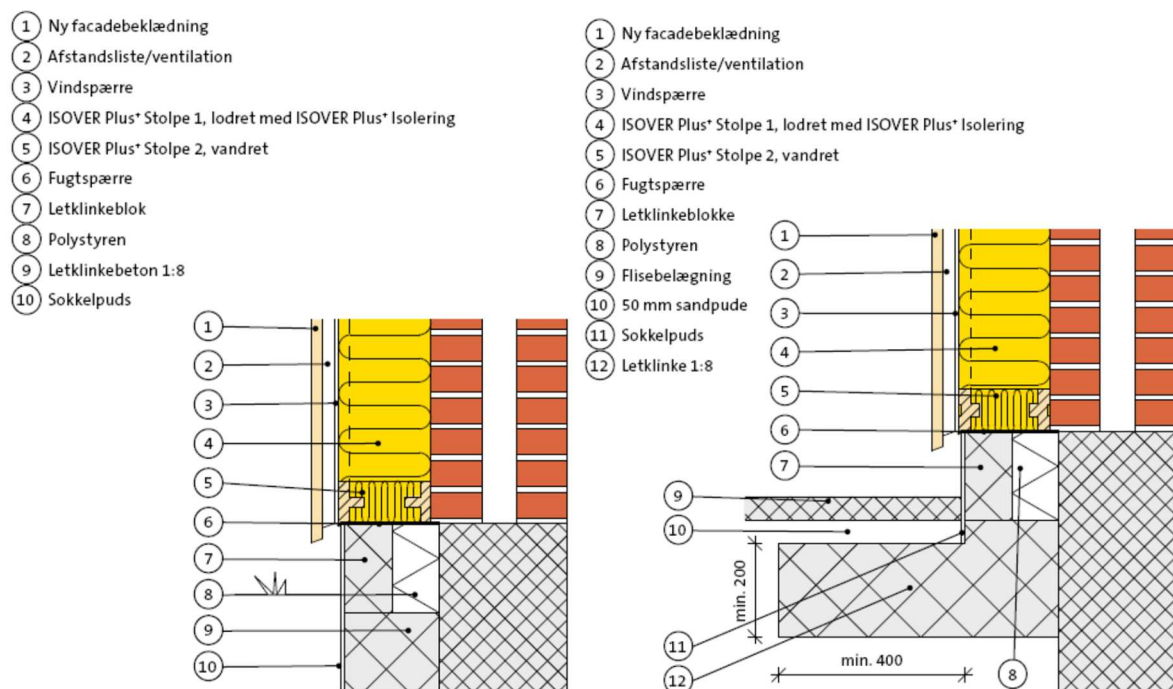
Begge typer forudsættes med kapillarbrydende drænlag af 150 mm singels. En konstruktion med min. 150 mm løse letklinker som kapillarbrydende lag og varmeisolering har omtrent samme isoleringsevne som 50 mm mineraluld på sten og har haft en vis udbredelse. Trægulv på strøer antages udført med 22 m trægulv på strøer med hulrum og 50 mm mineraluldsbatts.

4.2 Tiltag til reduktion af varmetab ved ydervægsfundament

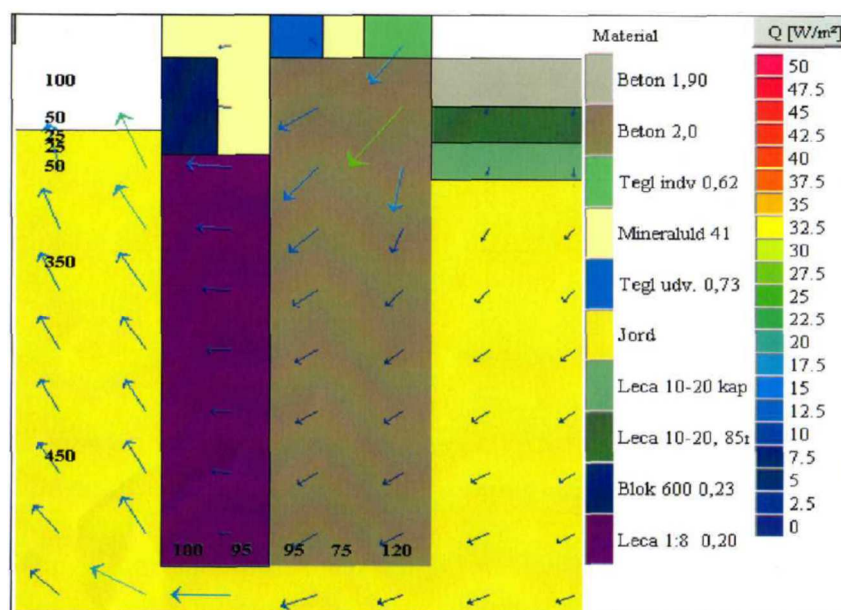
4.2.1 Eksisterende efterisoleringsløsninger

Der er taget udgangspunkt i efterisolering med Isover Plus Systemet, som fremgår af Figur 13. Fundamentsløsningen med lodret isolering er baseret på udgravning langs ydervægsfundamenterne og "pragmatisk" udstøbning med let isolerende letklinkerbeton 1:8 på grund af ujævnheder i fundamentets overflade. Fundamentsløsningen med vandret isolering er et alternativ, som har den ulempe at den er i fare for at blive kompromitteret i brug, f.eks. gravet op ved havearbejder.

Et konkret eksempel på løsning/model med lodret efterisolering i hele fundamentets dybde fremgår af Figur 14. Med denne løsning vil linjetabet omtrent kunne halveres fra 0,80 til 0,40 W/mK, hvilket viser at det er svært at reducere linjetabet til nybyg niveau (0,12 W/mK i BR10 for tilbygninger).



Figur 13. Fundamentsløsning med hhv. lodret og vandret efterisolering.



Figur 14. Beregningsmodel af ydervægsfundament i beton og lodret efterisoleringsløsning.

De 3x3x2 typer af fundamenter, ydervægge og terrændæk kan kombineres på 18 forskellige måder, men nogle kombinationer er ikke relevante at regne på. Det gælder f.eks. ydervægge af massiv porebeton (Y1), hvor det vurderes at de kun i sjældne tilfælde er opført med kuldebroafbrydende letklinkerbeton i soklen, idet væggen i sig selv er kuldebroafbrydende. Samtidig vurderes det at linjetabet for ydervæg med bagmur i porebeton (Y3) kun afviger væsentlig fra ydervæg med teglsten i bagmuren (Y2) i de tilfælde hvor soklen er udført i beton.

4.2.2 Metode til beregning af fundamentslinjetab

Der er regnet på typiske eksisterende konstruktioner før og efter efterisolering med Isover Plus Systemet (se evt. afsnit 3.2).

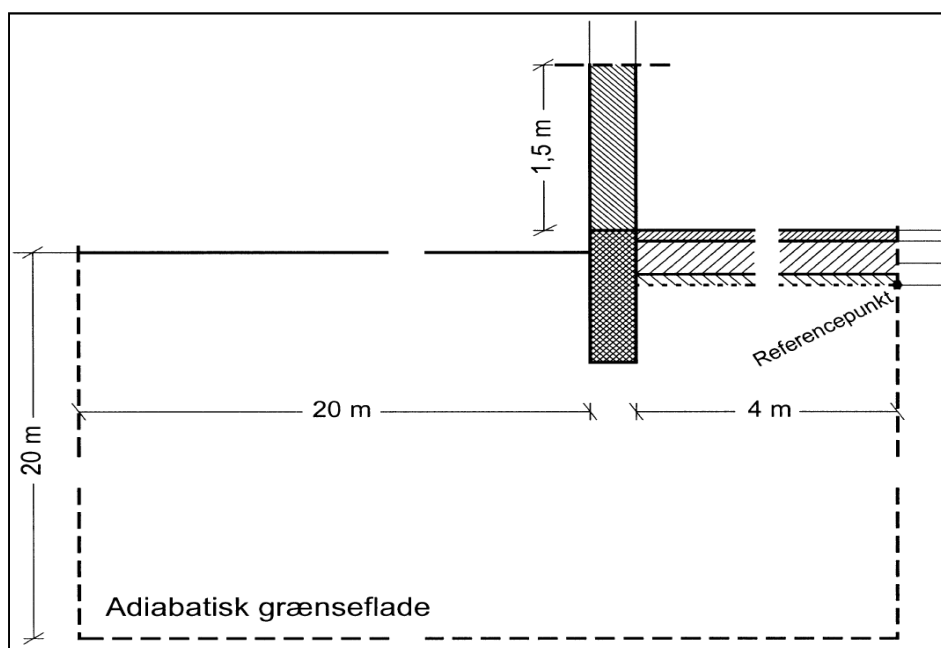
Beregningerne er foretaget i henhold til metode beskrevet i DS418 anneks D (Dansk Standard, 2011). Beregningerne er gennemført med programmet HEAT2 (version 7.1).

I Figur 15 er vist model for beregning af linjetabet, som beregnes på følgende vis:

$$\Psi_f = Q_{total,2D} - Q_{ydervæg,1D} - \frac{Q_{terrændæk,1D}}{\Delta T_{inde-ude}}$$

Hvor:

- $Q_{total,2D}$ Den samlede gennemsnitlige 2-dimensionale varmestrøm gennem de indvendige overflader i perioden september til maj
- $Q_{ydervæg, 1D}$ Den 1-dimensionale varmestrøm gennem de nederste 1,5 m af ydervæggen (september til maj)
- $Q_{terrændæk, 1D}$ Den 1-dimensionale varmestrøm gennem de yderste 4,0 m af terrændækket (september til maj), hvor varmestrømmen er baseret på temperaturen i referencepunkt lige under det kapillarbrydende lag og transmissionskoefficienten bestemt mellem rum og referencepunkt.
- $\Delta T_{inde-ude}$ Den gennemsnitlige forskel mellem rum- og udetemperatur (september til maj)



Figur 15. Model for beregning af linjetab for ydervægsfundamenter.

Tabel 2. Varmeledningsevne for materialer i fundament, ydervæg og terrændæk.

VARMELEDNINGSEVNE	
	W/mK
Jord	2,0
Beton, fundament	2,0
Beton, terrændæk	1,9
Tegl indv	0,62
Tegl udv	0,73
Murværk af porebetonblokke (700 kg/m ³)	0,26
Bagmur af porebeton, etagehøje plader (650 kg/m ³)	0,18
Letklinkerbeton 1:8 mod jord	0,20
Letklinkerblokke (600 kg/m ³ , trykstyrke: 2,3 Mpa.)	0,23
Eksisterende isolering, over terræn	0,050
Eksisterende isolering, mod jord	0,055
Efterisolering ydervæg/sokkel	0,041
Foamglas (trykstyrke: 0,7 Mpa)	0,042
Lodret fundamentsisolering indvendigt	0,038
Polystyren/mineraluld udvendigt mod fundament	0,038 + 20% = 0,046

Trægulv på strøer er modelleret simpelt ved at indlægge en isolans på overfladen af betondækpladen svarende til isolansen af isolering, hulrum og trægulv (1,33 m²K/W).

4.2.3 Beregnet fundamentslinjetab

Resultater af beregningerne fremgår af Tabel 3, hvor det ses at isolering over betonpladen (T2) og kuldebroyisolering i form af isolerende letklinkerblok(ke) under bagmuren (F2) eller i hele soklens bredde (F3), som udgangspunkt har en betydelig effekt på linjetabet.

Tabel 3. Linjetab (Ψ_f) for kombinationer af fundament, ydervæg og terrændæk for situation før og efter efterisolering med Isover Plus System (195 mm stolper) og lodret fundamentsisolering.

LINJETAB FOR FUNDAMENTSSAMLING						
Ydervæg	Eksisterende fundament		Isolering over betonplade			
			Nej (T1)		Ja (T2)	
			Før	Efter	Før	Efter
Y1 ¹	F1	Beton	0,76	0,43	0,38	0,29
	F2	Beton m 1 LKB blok	Sjældent forekommende konstruktion			
	F3	Beton m 2 LKB blokke	Sjældent forekommende konstruktion			
Y2 ²	F1	Beton	0,82	0,41	0,51	0,31
	F2	Beton m 1 LKB blok	0,47	0,29	0,35	0,25
	F3	Beton m 2 LKB blokke	0,36	0,26	0,28	0,22
Y3 ³	F1	Beton	0,77	0,42	0,36	0,23
	F2	Beton m 1 LKB blok	Omtrent som for Y2F2			
	F3	Beton m 2 LKB blokke	Omtrent som for Y2F3			

¹ 23 cm murværk af porebetonblokke

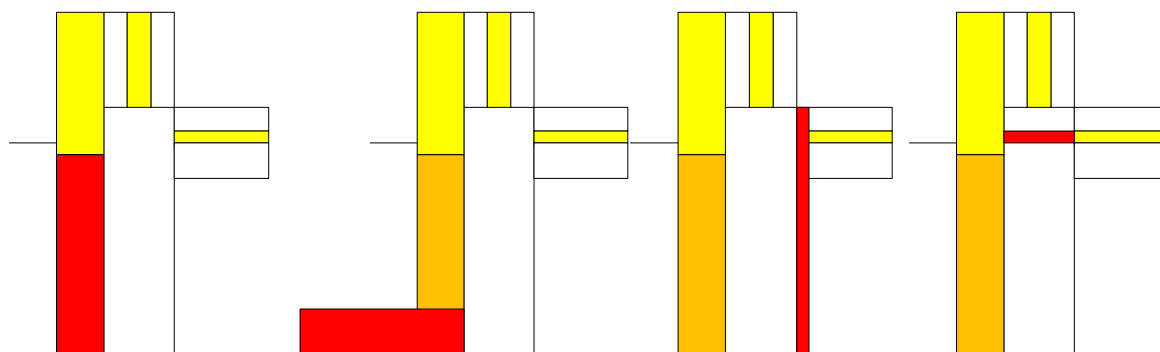
² 30 cm ydervæg med bagmur i teglsten eller letklinkerbeton

³ 30 cm hulmur med bagmur i porebeton

4.2.4 Tiltag til reduktion af fundamentslinjetabet

Med udgangspunkt i ovenstående analyser kan ydervægsgfundamenters linjetab reduceres på følgende vis (se Figur 16):

- Udvendig lodret isolering med materialer med bedre isoleringsevne
- Udvendig vandret isolering med materialer med bedre isoleringsevne
- Indvendig fundaments- og kantisolering
- Vandret trykfast isolering i fundament (f.eks. foamglass)



Figur 16. Muligheder for begrænsning af fundamentslinjetabet i forbindelse med facadeisolering inkl. fundament.

De to sidstnævnte tiltag er ret vidtgående. Indvendige fundaments- og kantisolering vurderes kun at være relevant hvis terrændækket skal renoveres af andre årsager, f.eks. vandskade. Indbygning af vandret trykfast isolering i den øvre del af fundamentet vil kun være relevant for rene betonfundamenter. Tiltaget omfatter gennemskæring af fundamentet, hvorved der kan anbringes en trykfast isolering som f.eks. 50 mm foamglass for effektiv kuldebroafbrydelse og etablering af et "ubrudt" isoleringsplan. Beregninger viser at tiltaget vil reducere linjetabet fra 0,41 til 0,28 W/mK (fuldmuret ydervæg). Det vurderes at skæring, indlægning af foamglass og understøbning skønsmæssigt vil koste ca. 2000 kr. pr. lbm facade og at energibesparelsen kun løber op i 10 kr./m for et typisk parcelhus. Derfor må tiltaget betragtes som urealistisk, selvom det giver fordele i form af reduceret fodkulde, risiko for skimmelvækst mv.

4.2.5 Fundamentslinjetab for "ny blok"

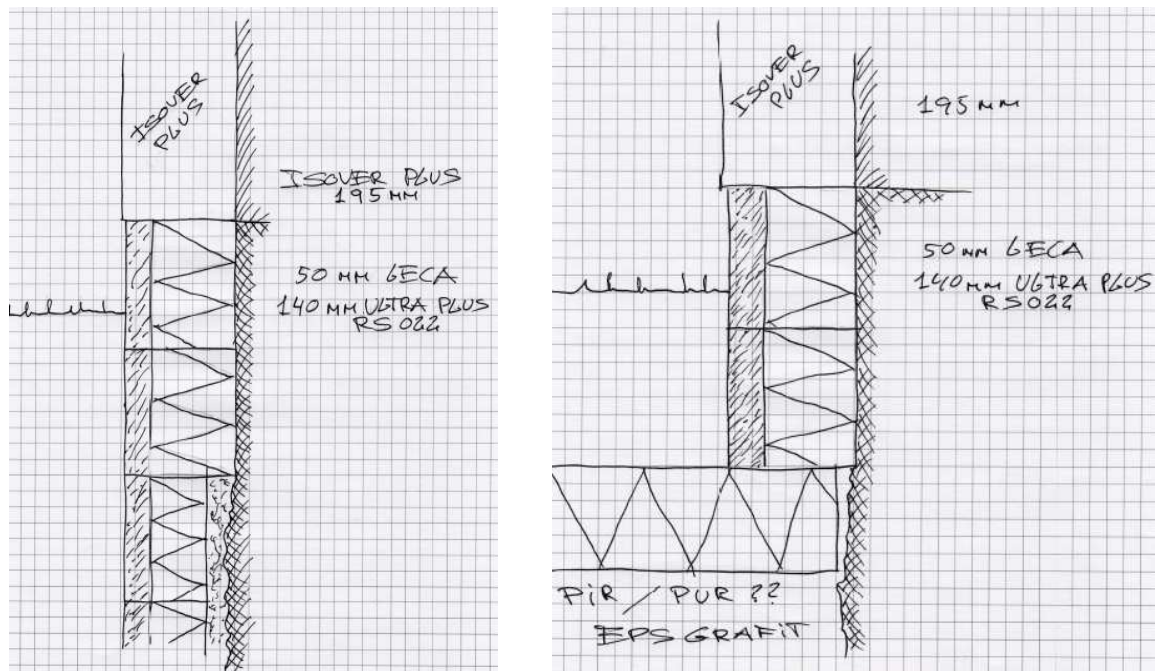
Der er udviklet et en ny fundamentsblok til udvendig fundamentsisolering (lodret og/eller vandret) og understøtning af Isover Plus System.

De nye "lecaterm" blokke består af 50 mm letklinkerbeton og PF isolering (λ 22) i passende tykkelse. Isoleringsmaterialet er det samme som anvendes i facadeisoleringssystemet Weber Therm Plus Ultra. Der er altså tale om en udvendig fundamentsisolering der er en faktor 10 bedre isolerende end letklinkerbeton 1:8.

To systemer passer til Isover Plus System, 195 mm stolper (se Figur 17), nemlig 50 mm letklinkerbeton og 140 mm PIR (øverste 2 skifter) eller 50 mm letklinkerbeton og 90 mm PIR (øvrige skifter), idet der er indregnet 50 mm "tolerance" til håndtering af ujævnheder på fundamentet nedre del.

Til Isover Plus System, 290 mm stolper anvendes blokke med 95 mm mere isolering, svarende til den forøgede facadeisoleringstykkelse.

I stedet for at føre den lodrette fundamentsisolering helt til underkant fundament i form af 5 skifter á 20 cm, kan der anvendes 2 skifter plus vandret isolering i jord i form af f.eks. en fugtsikker EPS eller EPS med grafit (lambda 31).



Figur 17. Nye fundamentsløsninger

I Tabel 4 er vist beregninger af "Worst Case", svarende til fuldmuret ydervæg (Y2) på betonfundament (F1) og terrændæk med isolering under betonplade (T1).

Tabel 4. Linjetab Ψ_f for ydervægsfundamenter af beton med eksisterende og nye fundamentsløsninger med lodret og/eller vandret isolering.

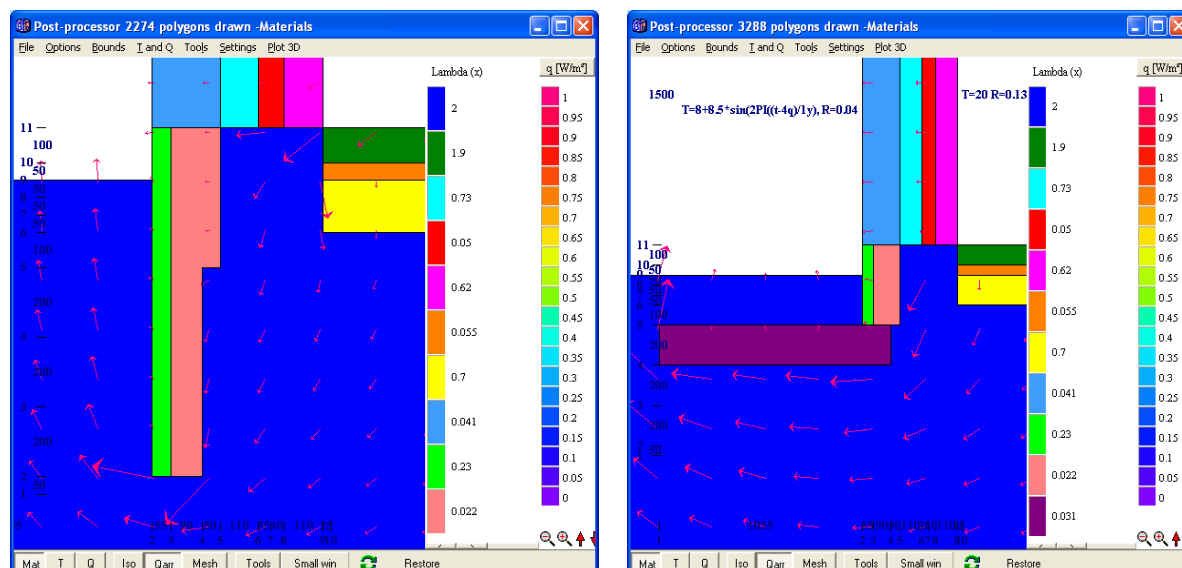
LINJETAB FOR YDERVÆGSFUNDAMENTER				
#	Facadeisolering	Fundamentsisolering	Antal skifter ¹	Linjetab
1	Før renovering	Ingen	0	0,82
2	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, letklinker 1:8	2	0,51
3	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, letklinker 1:8	5	0,41
4	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Vandret, 400mm, letklinker 1:8	2	0,45
5	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, ny blok ²	1	0,58
6	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, ny blok	2	0,48
7	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, ny blok	3	0,41
8	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, ny blok	4	0,37
9	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, ny blok	5	0,33
10	Isover Plus, 290 mm, λ_{32}	Lodret, ny blok	5	0,31
11	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Lodret, ny blok	5	0,19 ³
12	Isover Plus, 195 mm, λ_{37}	Vandret, ny blok, 1200mm	3	0,33 ⁴

¹ Antal skifter er dybden af fundamentsisoleringen fra overkant fundament/underkant facadeisolering (1 skifte = 20 cm)

² 50mm Leca+140 mm Ultra Plus RS 022 første 2 skifter, herefter reduceret isoleringstykkelse med 50 mm

³ Porebetonbagvæg og isolering over betonplade

⁴ EPS med grafit i 200 mm tykkelser, som maksimal standard tykkelse



Figur 18. Beregningsmodel og varmestrøm for løsning # 9 og #12, som giver anledning til samme linjetab (0,33 W/mK).

5 INDSATSOMRÅDE 3 - VINDUER OG DØRE INKL. SAMLINGER TIL YDERVÆG

5.1 Eksisterende vinduer og døre

I starten af 1960'erne blev den forseglede termorude bestående af to lag glas med typisk 12 mm luft i mellemrummet "opfundet". Derved forbedredes U-værdien til ca. 2,8 W/m²K, altså mere end en halvering i forhold til ét lag glas. Termoruderne blev herefter meget udbredt og anvendt i det meste af byggeriet helt frem til midt i 1990'erne, hvor de energimæssigt meget bedre 2-lags energiruder, så dagens lys.

5.2 Tiltag til reduktion af varmetab gennem vinduer og døre

5.2.1 Skifte termoruder

Da varmetabet kan reduceres betydeligt ved at skifte til energiruder og da vinduers rammekarm konstruktion typisk har en længere levetid end ruden, kan det være fornuftigt kun at udskifte ruden med en energirude i forbindelse med renovering.

Udskiftning af termoruder til nye energiruder er normalt en nem og forholdsvis billig løsning, men i nogle tilfælde kan indbygning af nye, tykkere energiruder kræve så meget håndværkertungt/dyrt tilpasnings- og monteringsarbejde at nye vinduer var en bedre løsning.

Det kan være relevant at skifte eksisterende termoruder til enten:

2-lags energiruder med argon i samme tykkelse: $U_g = 1,2 - 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (4-12-4)

2-lags energiruder med argon og med optimal spaltebredde: $U_g = 1,0 - 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (4-16-4)

3-lags energiruder i forskellige udformninger: 0,5 - 0,7 W/m²K

En 2-lags energirude med samme tykkelse som den eksisterende medfører altså blot en lidt højere U-værdi end med optimal spaltebredde og fortsat meget bedre end den gamle rude. Hvis der anvendes krypton gasfyldning i en 2-lags energirude med sammen tykkelse som i en eksisterende termorude, kan der opnås samme U-værdi ($U_g = 1,0 - 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$), som for en typisk 2-lags energirude med argon.

Udvendig kondens kan opstå for 2-lags ruder, men især 3-lags energiruder, hvis en række faktorer arbejder ugunstigt sammen – hvis det er vindstille, koldt og klart vejr og der er en høj luftfugtighed i udeluften – hvilket naturligvis også gælder nye vinduer med energiruder.

Løbende enkeltudskiftninger når ruder f.eks. punkterer, kan blive dyrt i længden, så man bør overveje at få alle ruder udskiftet samtidigt. Dette aspekt er dog mindre aktuelt, hvis der er tale om gør-det-selv arbejde.

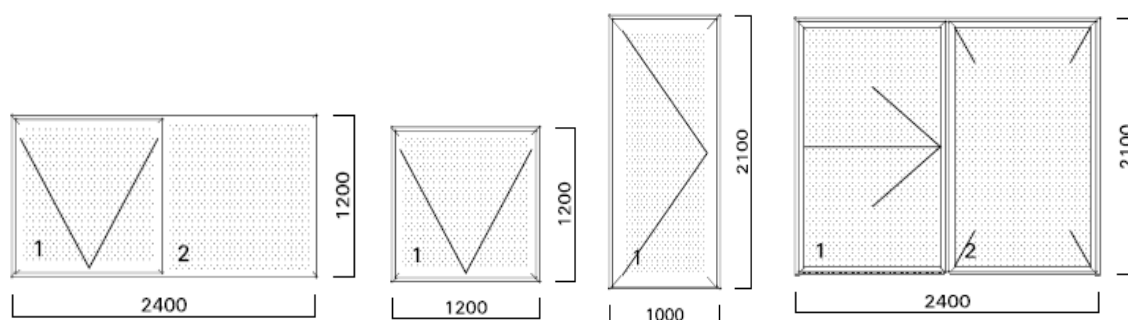
Udskiftning af termoruder til energiruder reducerer lysindfaldet, men der er i modsætning til vinduesudskiftning ikke mulighed for at kompensere i form af valg af vinduer med f.eks. smallere ramme-karm konstruktion og dermed større glasareal.

5.2.2 Skifte facadevinduer og -døre

Der er generelt et stort behov for at skifte eksisterende vinduer og døre i huse fra 1960/70'erne. Hvis vinduer og døre er udført i hårde træsorter (f.eks. teak eller mahogni) eller er udskiftet for nylig, er det mindre oplagt at montere nye energirigtige vinduer og døre (men det kan være relevant at skifte gamle termoruder til energiruder). Hvis der i facaderne er gennemgående murrem for bæring af taget, kan man komme ud for at remmen ikke er understøttet af søjler/damprør ved vinduesbånd, men at vinduerne bidrager til at understøtte remmen. Dette kræver naturligvis stor opmærksomhed og afklaring inden igangsætning af renoveringsarbejde.

5.2.2.1 Produktsammenligning

Man kan skifte eksisterende facadevinduer og -døre til almindelige energivinduer med 2-lags energirude eller lavenergivinduer med 3-lags energirude. I Figur 19 er vist eksempler på typiske udformninger af vindues- og dørelementer.



Figur 19. Typiske udformninger af vindues- og dørelementer i form af topstyrede vinduer, facadedør og skydedør.

I Tabel 5 er vist energimæssige data for typiske udformninger af vindues- og dørelementer og for forskellige vinduesprodukter med hhv. 2-lags og 3-lags energirude:

PRO TEC Classic (Træ-Alu)

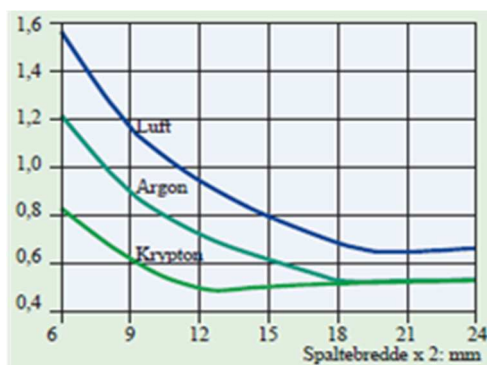
PRO TEC Classic+ (Træ-Alu)

PRO TEC 7 Multi (GRP-Træ)

De to sidste produkter er at betragte som lavenergiprodukter. De beregnede data er den samlede U-værdi (U_w), solenergitransmittans for rude (G_g), lystransmittans for rude (LT), glasandel (Ff) samt energitilskuddet (E_{ref}).

Tabel 5. Produktsammenligning. Standard- og lavenergiprodukter fra Pro Tec Vinduer A/S med forskellige rudeløsninger og typiske vindues- og dørudformninger. Skydedør fås ikke som lavenergiprodukt. $E_{ref} = 196,4 \cdot G_g \cdot F_f - 90,36 \cdot U_w$.

PRODUKTSAMMENLIGNING, VINDUER OG RUDER						
	U_w [W/m ² K]	G_g [-]	LT [-]	F_f [-]	E_{ref} [kWh/m ² /år]	Pris [Kr.]
PRO TEC Classic (Træ-Alu), 2-lags energirude med argon, 4-18-4 (26)						
Vindue, 2400x1200	1,31	0,63	0,80	0,81	-18	3.911
Vindue, 1200x1200	1,37	0,63	0,80	0,74	-33	2.620
Dør, 1000x2100	1,70	0,63	0,80	0,66	-72	4.005
Skydedør, 2400x2100	1,43	0,63	0,80	0,80	-31	10.036
PRO TEC Classic (Træ-Alu), 3-lags energirude med argon, 4-12-4-12-4 (36)						
Vindue, 2400x1200	0,99	0,49	0,71	0,81	-11	4.607
Vindue, 1200x1200	1,07	0,49	0,71	0,74	-26	2.952
Dør, 1000x2100	1,43	0,49	0,71	0,66	-66	4.388
PRO TEC Classic+ (Træ-Alu), 3-lags energirude med argon, 4-18-4-18-4 (48)						
Vindue, 2400x1200	0,71	0,49	0,71	0,81	14	4.517
Vindue, 1200x1200	0,75	0,49	0,71	0,73	2	3.020
PRO TEC 7 Multi (GRP-Træ), 2-lags energirude med argon, 4-16-4 (24)						
Vindue, 2400x1200	1,30	0,63	0,80	0,82	-17	4.920
Vindue, 1200x1200	1,35	0,63	0,80	0,75	-30	3.356
Dør, 1000x2100	1,41	0,63	0,80	0,66	-46	5.599
PRO TEC 7 Multi (GRP-Træ), 3-lags energirude med argon, 4-12-4-12-4 (36)						
Vindue, 2400x1200	0,95	0,49	0,71	0,82	-8	5.231
Vindue, 1200x1200	1,02	0,49	0,71	0,75	-21	3.498
Dør, 1000x2100	1,12	0,49	0,71	0,66	-38	5780



Figur 20. U-værdi for 3-lags energiruder med to 4 mm energiglas ved forskellige spaltebredder og gasfyldninger. Kilde: Pilkington.

Der er regnet med følgende rudeløsninger og U_g -værdier:

- 2-lags energirude med argon, 4-18-4 (26): ca. 1,1 W/m²K
- 3-lags energirude med argon, 4-12-4-12-4 (36): ca. 0,7 W/m²K

Denne kan forbedre med større glasafstand (se Figur 20):

- 3-lags energirude med argon, 4-18-4-18-4 (48): ca. 0,5 W/m²K.

I stedet for at øge glasafstanden i 3-lagsruden, kan der anvendes krypton fyldning mellem glassene for omtrent samme effekt (se Figur 20):

- 3-lags energirude med krypton, 4-12-4-12-4 (36): ca. 0,5 W/m²K
- (25% mindre rudetykkelse)

Krypton er dog meget dyrere end argon, så den er kun relevant under særlige forhold.

Produktsammenligningen viser at Pro Tec Classic+ med 3-lags energirude (4-18-4-18-4) pris- og ydelsesmæssigt er mest konkurrencedygtig. Pro Tec 7 produktet falder dårligere ud, da glasfiberarmeret polyester (GRP), som indgår, er dyrt. Dette forhold vil kunne ændre sig i fremtiden.

5.2.2.2 Overfladetemperaturkrav

For at imødekomme problemer med kondens på dårligt isolerende vinduesrammer, stiller Bygningsreglementet (BR2010) nu krav til at overfladetemperaturen på vinduesrammer i ydervægge ikke må være lavere end 9,3°C ved 20°C inde og 0°C ude. De laveste overfladentemperaturer for PRO TEC's produkter er vist i Tabel 6.

Det ses, at overfladetemperaturen ligger på 11,8 – 13,5 °C og de omtalte produkter kan altså udmærket overholde kravet. Det er værd at bemærkes, at husejere i en typisk renoveringssituation med vinduesudskiftning er ret tolerante angående overfladetemperaturen, da de typisk vil opleve en stor komfortforbedring.

Tabel 6. Laveste overfladetemperaturer for PRO TEC vinduer.

OVERFLADETEMPERATURER			
	Tykkelse	U_g	Overfladetemperatur
	mm	W/m ² K	°C
Classic med standard 2-lagsrude	26	1,14	11,8
Classic med 3-lags rude	36	0,7	12,5
Classic+ med 3 lags rude	48	0,5	13,5
Seven Multi med 2-lags rude	24	1,14	13,0
Seven Multi med 3-lags rude	36	0,7	12,3

5.2.2.3 Vinduer og døre "isolerer" lige så godt som ydervæg og tag

Vinduer og døre har altid været det energimæssigt svage element i klimaskærmen, hvilket kom uheldigt til udtryk i 1980'erne, hvor man efter oliekriserne var opsat på at begrænse varmetabet fra vinduer og derfor skærpede energikravene, så det i praksis førte det til byggeri med væsentligt mindre vindues- og dørareal.

Udviklingen i mere energirigtige vinduer og døre har dog betydet at de transparente dele af klimaskærmen ikke længere belaster energiregnskabet, når man ser på energitilskuddet, altså forskellen mellem solvarmetilskud og varmetab, idet nettotabet svarer omtrent til varmetabet fra de efterisolerede, ikke-transparente dele af klimaskærmen. Dette giver større designfrihed ved nybyggeri, men også ved lavenergirenovering.

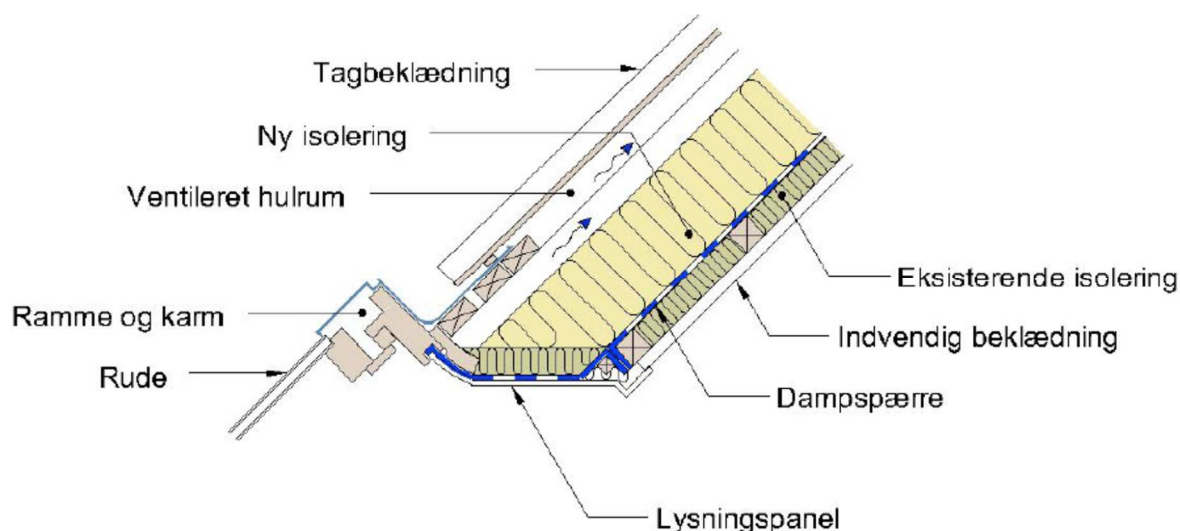
Et beregningseksempel i form af et typisk parcelhus på 135 m² (modelhus i Bilag 1: 1960/70'er parcelhuse) illustrerer dette. Følgende energibesparende tiltag er forudsat:

- Udvendig facadeisolering af hulmur i form af Isover Plus System med 290 mm stolper samt lodret fundamentsisolering ($U = 0,10$, $\Psi_f = 0,20$)
- Efterisolering af tætning af tag/loft svarende til 400 mm mineraluld ($U = 0,10$)
- Nye lavenergivinduer og -døre, der flyttes med ud i facaden: PRO TEC Classic+ med 3-lags energirude med argon med energidata for 1,2 x 1,2 m vindue i Tabel 5.
- State-of-the-art balanceret mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding
- Nyt kondenserende gasfyr med lavtemperaturdrift
- Solvarmeanlæg til varmt brugsvand

Med disse energibesparende tiltag, viser en Be10 beregning at energibehovet reduceres til 44,0 kWh/m², hvor kravet til lavenergibygningsklasse 2015 er 37 kWh/m². Hvis vinduer og døre "erstatte" af isoleret ydervæg med $U = 0,10$, kan beregnes et energibehov på 45,0 kWh/m². Nye lavenergivinduers energimæssige ydeevne er altså på niveau med en velisoleret ydervæg, og kan således erstatte den og huset kan samtidig opretholde omtrent den samme energimæssige ydeevne. Det kan dog være fornuftigt at begrænse vindues- og dørarealet af hensyn til at undgå for høje indetemperaturer.

5.2.3 Skifte/etablere ovenlys

Udskiftning og/eller etablering af ovenlysvinduer i parcelhuse udføres oplagt i forbindelse med tagrenovering. Udskiftning af eksisterende ovenlysvinduer vil typiske have en betydelig energibesparende effekt. Nyetablering af ovenlysvinduer kan være relevant for at få mere lys i dybe rum eller tagetager. Typiske ældre ovenlysvinduer har en U -værdi på 3,0 W/m²K. Det typiske ovenlysvindue på markedet i dag har en $U_w = 1,4$ W/m²K med en 2-lags energirude og $U_w = 1,0$ W/m²K med 3-lags energirude.



Figur 21. Eksempel på samling mellem ovenlysvindue og tag (kilde: Videncenter for energibesparelser i bygninger)

Ovenlysvinduer indbygges typisk mere yderligt i tagkonstruktionen end facadevinduer, hvilket giver relativt høje linjetabsværdier. Der findes dog nye indbygningsmetoder, som isolerer omkring ovenlysvinduet i det kritiske område og/eller trækker ovenlysvinduet længere ind i konstruktionen, og dermed giver bedre linjetabsværdier.

Ovenlysvinduer leverer væsentligt mere lys end facadevinduer. Ovenlysvinduer leverer f.eks. en jævnt fordelt naturlig belysning, der er ca. 3 gange så intens som dagslys fra facadevinduer med samme rudeareal. Der opnås den samme tilfredsstillende belysning, med et meget mindre vinduesareal, end en bygning kun med facadevinduer. Samtidig vil installation af ovenlysvinduer reducere elforbruget til belysning. Ovenlysvinduer resulterer desuden i et betydeligt solvarmetilskud til bygningen.

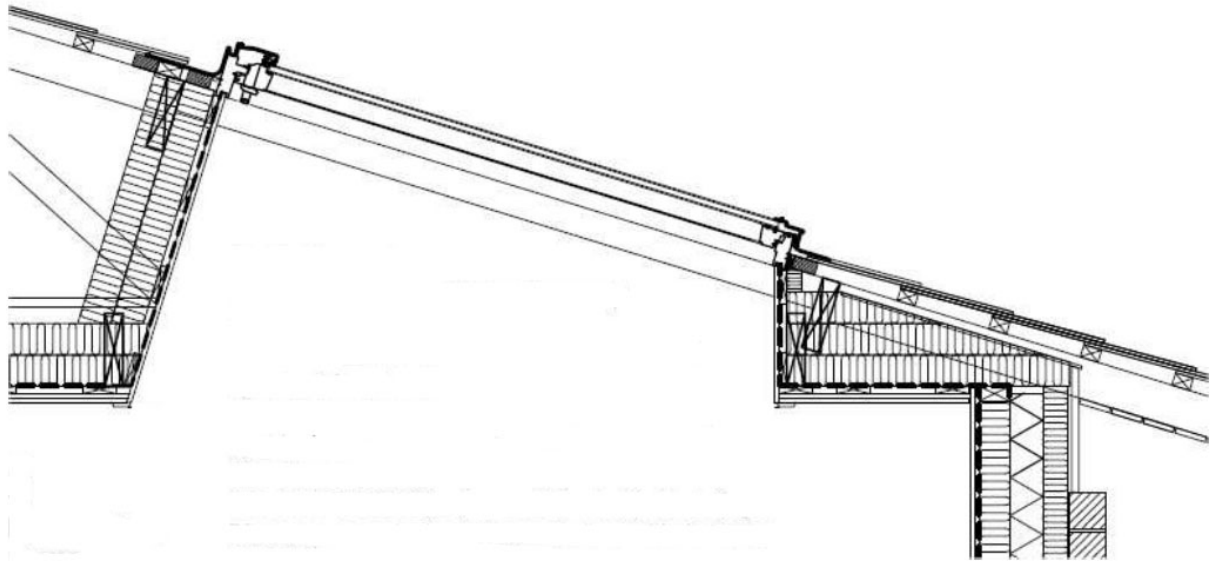
Ovenlysvinduer bør udstyres med solafskærmning for at begrænse overophedning i sommerhalvåret, og minimere varmeudstråling om natten i vinterhalvåret.

I forbindelse med udskiftning af ældre ovenlysvinduer med nye og energimæssigt forbedrede egenskaber, er det værd at undersøge, om det er muligt, at indbygge et eller flere ekstra ovenlysvinduer, hvorved der kan opnås lysere rum og energibesparelser fra den elektriske belysning uden nødvendigvis at øge opvarmningsbehovet. Tagets varmetab øges, men det opvejes omtrent af et større gratisvarmetilskud fra solen. Det bør også undersøges om ovenlysvinduer kan omplaceres for bedre udnyttelse i forhold til lys og energi.

5.2.4 Lystunneller

Lystunneler for lys til rum og gangarealer, der ligger midt i huset og ikke har vinduer i facaden. Hvis disse rum heller ikke ligger under tagfladen, er den eneste realistiske mulighed for at få dagslys at etablere en eller flere lystunneler. For typiske parcelhuse med lav

taghældning er det eventuelt muligt med en fornuftig integration af ovenlysvinduer i taget, se Figur 22.



Figur 22. Eksempel på integration af ovenlysvindue i gitterspær tag. Alternativ til lystunnel. Kilde: Energirenovring af 70'er hus, Teknologisk Institut, 2010

5.3 Samlinger omkring vinduer og døre

Der er behov for optimerede vinduesmontageløsninger vedr. isolering og lufttæthed mv. Der redegøres for metoder til montage af vinduer, så der sikres optimal isolering og et lille linjetab.

Bygningsreglementet BR10's krav til linjetabet i samlinger omkring vinduer og døre er 0,03 W/mK, hvis der samtidig gennemføres forbedringer af de elementer, der er årsag til linjetabet. Dette er tilfældet, hvis der skiftes vinduer og facadeisoleres.

5.3.1 Løsningsrum

I forbindelse med udvendig facadeisolering kan de eksisterende vinduer enten bevares (glasset kan evt. skiftes til energirude) eller der kan monteres nye energirigtige vinduer. Uanset hvilket tilfælde kan vinduernes placering enten fastholdes eller de kan flyttes med ud i facaden. Derudover kan husejere have ønske om at nyetablere vinduer i ydervægge ved f.eks. mørke rum med begrænset vinduesareal.

I Tabel 7 er vist en oversigt over oplagte løsninger for vinduesmontage ved facadeisolering i form af enten isoleret skelet (f.eks. Isover Plus System) eller fuldklæbning af isoleringsplader/-batts (f.eks. Isover facadekoncept). *Weber therm plus ultra* er et eksempel på kompaktisolering (fenolskum) og vil især være relevant at anvende, hvis vinduesplaceringen bibeholdes, for derved at undgå at vinduerne alt andet lige kommer til at sidde for dybt i murhullet.

Tabel 7. Muligheder for vinduesmontage, når vinduer og facade energirenoveres.

MULIGHEDER FOR VINDUESMONTAGE					
Vinduesrenovering	Skifte		Bevare og flytte		Bevare
Facadeisoleringssystem	Skelet	Plader der fuldklæbes	Skelet	Plader der fuldklæbes	Plader der fuldklæbes
Vinduesmontage/-fastgørelse	Stolpe	Eksist. mur	Stolpe	Eksist. mur	-
Facadeisoleringstykkelse	Varierende				
Vinduesplacering	I flugt med facade / midt for facadeisolering				Fastholdt
Forskudt fals	Forøgelse af vinduesmål ¹				Efterisolering på karm ²
Isoleret lysning	Ja / nej				

1) Større glasareal for fastholdt ramme-karmbredde og ændret udseende indefra

2) Ændret udseende udefra

I Figur 23 er vist eksempler på samlinger omkring vinduer. Nye vinduer eller eksisterende vinduer som flyttes med ud ved facadeisolering, kan indbygges med relativt lille linjetab (se

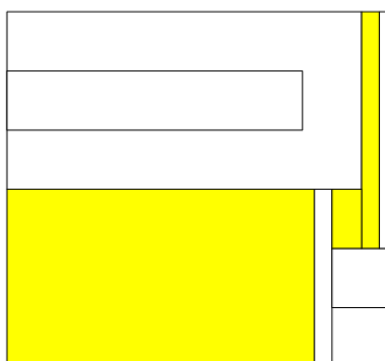
detalje #1+2). Isolering mellem lysningspanel og ydervæg vil have positiv indvirkning på linjetabet (#1). Vinduer kan også placeres forskudt fra efterisoleringen (se #1 variant).

Hvis der er tale om en facadeisoleringssløsning, hvor vinduet ikke kan fastgøres (se #2), er der behov for beslag for fastgørelse i den eksisterende mur. Der findes på markedet i dag nogle få beslagssystemer til vinduesmontage, hvor et af disse er *Simpson Strong Tie's* montagesystem i form af konsol-bærebear, forlængerbear, trykbear og skråbear i stål, som især er udviklet til energirigtigt nybyggeri, men som kan benyttes til renovering. En oplagt forbedringsmulighed er at anvende kompositmaterialer med lavere varmeledningsevne som f.eks. *Glassfiber Reinforced Polyester* (GRP).

Hvis vinduer bevares og ikke flyttes med ud i facaden er det vigtigt at isolere op omkring karmen for at bryde kuldebroen bagom karmen (# 3). Anvendelse af nye højisolerede materialer og beskedne efterisoleringstykkelser på måske 100 mm muliggør i højere grad efterisolering uden at flytte vinduerne.

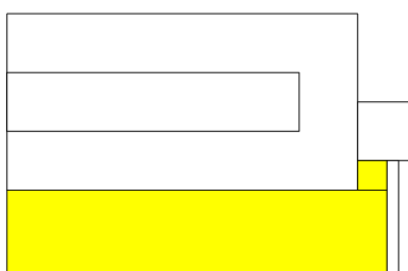
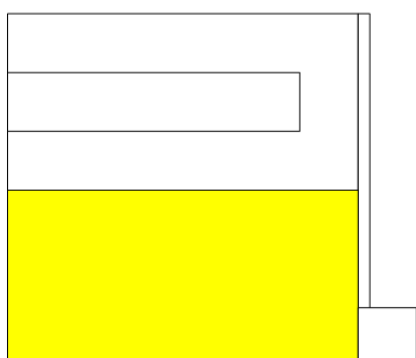
1. Skeletkonstruktion, vindue i flugt med facade, fastgjort i stolpe/plade og ny isoleret lysning

Variant af 1.: montering i forskudt fals og vinduesplacering midt i isoleringen



2. Isoleringplader fuldklæbet til eksist.mur, vindue i flugt med facade, fastgjort til eksisterende mur og ny lysning

3. Højisolerede plader fuldklæbet til eksist.mur, eksisterende vindue/placering og kuldebroisolering



Figur 23. Eksempler på samlinger omkring vinduer.

6 INDSATSOMRÅDE 4 - TAG

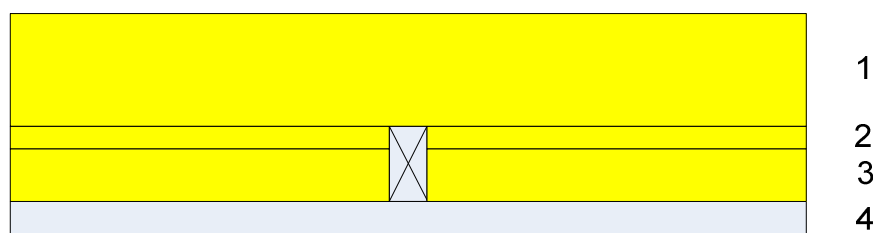
6.1 Gitterspær konstruktion - vandret isolering

Tag af gitterspær er en klassiske tagkonstruktion i enfamiliehuse. Isoleringen er placeret vandret, mellem og evt. over spærfødderne og der er ventileret tagrum. Konstruktionen kan isoleres alene eller i forbindelse med tagudskiftning, hvor sidstnævnte har en række fordele.

Sikring af en lufttæt loftskonstruktion er beskrevet i afsnit 8 om lufttætning. Det antages for urealistisk at etablere en lufttæt loftskonstruktion oppefra i forbindelse med isoleringsarbejdet, og det anbefales derfor at foretage tætningen nedefra i form af ny loftbeklædning og samtidig ny lufttæt dampspærre. Efterisolering af tagfod er også behandlet i separat kapitel.

6.1.1 Efterisolering uden tagudskiftning

Efterisolering af typiske loftskonstruktioner med eksisterende isoleringstykkelse på f.eks. 100 mm og spærfod på 125 mm, foretages ved først at udbedre huller i det eksisterende isoleringslag med fyld af granuleret mineraluld og fyldning til overkant spærfod (se Figur 24). Herefter isoleres over spærfoden i tykkelse der fastlægges ud fra ønsket U-værdi og så spærfoden dækkes, så kuldebro igennem spærfoden undgås.



1. Isolering over spærfod, evt udført i to lag med forskudte samlinger
2. Granulat isolering til udbedring af huller i eksist. isolering og fyldning til overkant spærfod
3. Eksisterende isolering
4. Dampspærre, forskalling og loftbelædning, evt ny tæt dampspærre og loftbeklædning

Figur 24. Princip skitse af efterisolering af loftskonstruktion – lodret snit ved spærfod.

Alternativt til brug af granulat af isolering til opfyldning mellem spærfødder kan der anvendes isoleringsbatts op til en lille overhøjde i forhold til spærfoden og så udfyldes med isoleringsgranulat langs spærfødder og efterfølgende passende yderligere isolering.

En del eksisterende lofter er allerede blevet efterisoleret til f.eks. 200 mm, men det øverste lag isolering kan være i så dårlig stand at det vil være rimeligt at fjerne det og benytte en af de beskrevne efterisoleringsmetoder.

En eksisterende gangbro indgår ofte i en tagkonstruktionens stabilitet og det er derfor sikrest ikke at fjerne den og i stedet at isolere ovenpå den eksisterende gangbro med en hård mineraluld og plade lagt ovenpå. Hvis gangbroen kan fjernes uden skade for konstruktionens stabilitet, opklodses den nye gangbro på spærfødder og der isoleres på passende vis under gangbroen med en blød mineraluld. Der skal være ca. 30 mm afstand mellem isoleringen og den nye gangbro, når det er muligt at fjerne eksisterende gangbro, for at reducere evt. fugtgener.

Hvis efterisolering ikke foretages i forbindelse med udskiftning af taget, så besværliggør det arbejdet med efterisoleringen og installation af mekanisk ventilation med varmegenvinding. Pladsforholdene afhænger af taghældningen som typisk er 15-40°.

6.1.2 Tagudskiftning og efterisolering

Selve efterisoleringen foretages som beskrevet ovenfor. Men både isolerings- og ventilationsarbejder vil være nemmere, når det eksisterende tag er fjernet.

Hvis taget er fra før 1980, så indeholder det højst sandsynligt asbest og skal bortskaffes iht. gældende regler. De anvendte lægter lever måske ikke op til nugældende arbejdsmiljøregler, så der må evt. påregnes nye lægter med lidt større dimension.

Den ny tagbelægning etableres på eksisterende spær og eventuelt nye lægter. Forinden udføres et diffusionstæt undertag til beskyttelse mod sne og regn som trænger ind under tagdækningen. Dette fastgøres til spærene med en afstandsliste med en tykkelse på minimum 25 mm, så udluftning og bortledning af nedbør mellem lægter og undertag kan foregå uhindret. Der er behov for et effektivt ventileret tagrum, som opnås i praksis gennem spalter ved tagfod og åbninger ved tagryg, evt. suppleret med åbninger ved gavle.

6.2 Loft til kip - Skrå isolering

Hvis husets tag har åbent til kip er der mulighed for enten at efterisolere udefra eller indefra. Begge løsninger kræver at man åbner taget, enten oppefra eller nedefra, så det giver bedst mening at indføre tiltaget hvis huset skal have nyt tag eller nye lofter.

Den udvendige efterisolering foretages ved at den eksisterende tagbeklædningen fjernes, sammen med lægter og isolering. Herefter øges spærhøjden for at give plads til den ekstra isolering. En ny, tæt dampspærre monteres mod den gamle isolering.

Ved indvendig isolering er der også brug for en øgning af spærene, denne gang indad, da en ny dampspærre placeret umiddelbart under loftbeklædningen ikke vil opnå optimal tæthed. Ligesom ved udvendig efterisolering gælder det at dampspærren maksimalt må være placeret 1/3 inde fra den varme side, og det er meget vigtigt at en evt. eksisterende dampspærre fjernes eller perforeres så den helt mister sin effekt (Tommerup, 2010).

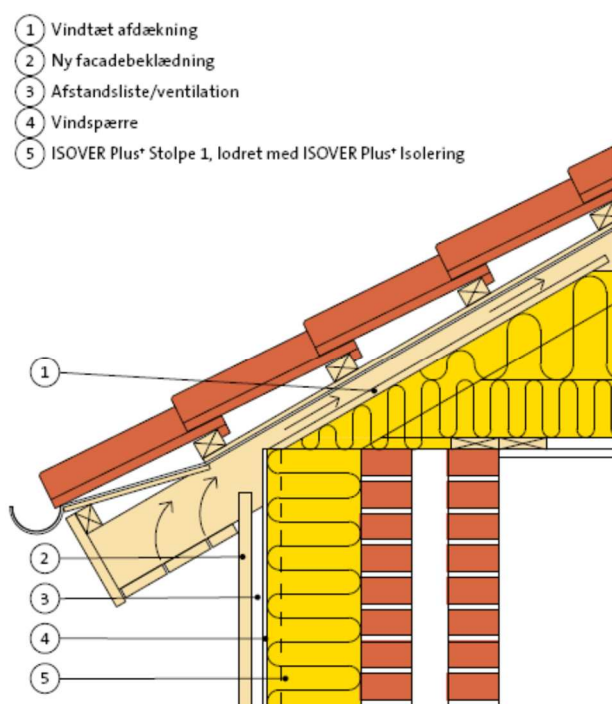
7 INDSATSOMRÅDE 5 - TAGFOD

7.1 Ny tagfod

Tagfoden kræver en særlig opmærksomhed, da det er her ydervæggen møder taget, og forbedringer på begge konstruktioner kan have stor betydning for tagfoden. En eksisterende tagfod kan bibeholdes uændret i forbindelse med facadeisolering, hvis udhænget er stort nok. Hvis taget skal skiftes er det nemmere at etablere en ny tagfod og dermed at integrere efterisolering af facader og tag.

7.1.1 Tagfodsdetalje ved gitterspær og hulmur – almindelige rem

Et typisk eksempel på sammenbygning af tag med gitterspær og tung væg i forbindelse med efterisolering fremgår af Figur 25.



Figur 25. Detalje ved tagfod efter efterisolering – gitterspær hviler af på bagmuren. Kilde: Isover.

Undertaget skal ventileres på undersiden med en spalte på minimum 50 mm i gennemsnit og da undertage af banevarer eller bløde plader vil hænge mellem tagspærene, anbefales det normalt at der projekteres med en spalte på mindst 70 mm. Gennemblæsning af isoleringen i tagfoden er sikret med vindtæt afdækning og tæt samling til facadeisoleringens vindspærre.

På grund af en typisk beskeden taghældning og krav om ventilation af tagkonstruktionen vil der ske en betydelig afskæring af isoleringen, som udgør en kuldebro. Som eksempel på

betydningen af linjetabet betragtes et efterisoleret hus med Isover Plus System, 195 mm stolpe, og i alt 400 mm isolering på loft, hvor $\Psi_{\text{tagfod}} = 0,10 \text{ W/mK}$ og der antages 0,4 m tagfod pr. m^2 loft (indvendige mål). Linjetabet fordeles med halvdelen på hhv. ydervæg og loft. U-værdier for loftskonstruktionen er $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tillægget til U-værdien fra tagfod er: $0,10 \text{ W/mK} \cdot 0,5 \cdot 0,4 \text{ m/m}^2 = 0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$ eller en forøgelse på 20%. Den effektive U-værdi for loftskonstruktionen bliver således $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$.

7.1.2 Eksempel på beregning af linjetabet

Ydervæggen antages opbygget (indefra-ud) af 108 mm teglsten, 75 mm isolering og 108 mm teglsten. Loftskonstruktionen antages opbygget (indefra-ud) af 13 mm gipsplade på spredt forskalling af 25 mm brædder, spærfod 63 x 125 mm pr. 1000 mm, 100 mm isolering mellem spær, ventileret tagrum. Materialeparametrene for de forskellige materialer er opstillet i Tabel 8.

Tabel 8. Materialeparametre.

MATERIALEPARAMETRE		
Materiale	λ [m]	Note
Gips	0,250	
Træ	0,150	
Isolering, eksisterende	0,050	DS418: Mineraluld over terræn i eksist. konstruktioner
Efterisolering, loft	0,037	
Efterisolering, ydervæg	0,041	Isover Plus System
Tegl	0,700	

Eksempler på beregning af den 1-dimensionale U-værdi for ydervæg og loftskonstruktion med og uden efterisolering fremgår af Tabel 9 og Tabel 10.

Tabel 9. Beregning af U-værdi for eksisterende loftskonstruktion med 100 mm isolering og eksisterende ydervæg med 75 mm isolering.

BEREGNING AF U-VÆRDI, LOFTKONSTRUKTION			
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans	-	-	0,140
Gipsplade	0,013	0,250	0,100
Spredt forskalling	-	-	0,160
Isolering + spær	0,100	0,056 ¹	1,776
Isolering	0	-	0,000
Tagrum og tag	-	-	0,200
		$\Sigma R =$	2,376
		U =	0,421
BEREGNING AF U-VÆRDI, EKSISTERENDE YDERVÆG			
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans	-	-	0,170
Tegl	0,108	0,700	0,154
Isolering	0,075	0,050	1,500
Tegl	0,108	0,070	0,154
		$\Sigma R =$	1,979
		U =	0,505

1) Beregnet som inhomogent materialelag, jf. afsnit 6.6 i DS 418.

Tabel 10. Beregning af U-værdi for efterisoleret loftkonstruktion med 400 mm isolering og efterisoleret ydervæg med 195 mm *Isover Plus System*.

BEREGNING AF U-VÆRDI, EFTERISOLERET LOFTKONSTRUKTION			
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans	-	-	0,140
Nyt gipspladeloft	0,013	0,250	0,052
Eksisterende træloft			0,100
Spredt forskalling	-	-	0,160
Isolering + spær	0,125	0,056 ¹	2,232
Isolering	0,275	0,037	7,432
Tagrum og tag	-	-	0,200
		$\Sigma R =$	10,317
		U =	0,097

BEREGNING AF U-VÆRDI, EFTERISOLERET YDERVÆG			
	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Overgangsisolans	-	-	0,130
Tegl	0,108	0,700	0,154
Isolering	0,075	0,050	1,500
Tegl	0,108	0,700	0,154
Efterisolering	0,195	0,041	4,756
Vindgipsplade	0,009	0,250	0,036
Ventileret hulm	-	-	0,130
		$\Sigma R =$	6,861
		U =	0,146

1) Beregnet som inhomogent materialeg, jf. afsnit 6.6 i DS 418.

Spærene vil være årsag til både 2- og 3-dimensionale bidrag. Erfaringsmæssigt er det fuldt tilstrækkeligt kun at regne de 2-dimensionale effekter med. Der er gennemført to 2-dimensionale beregninger af samlingen – én for et snit ved siden af spæret og ét for et snit i spæret. Programmet Therm er anvendt til beregningerne, hvor der kan modellere vilkårlige geometrier, så den skrå afskæring af isoleringen i loftskonstruktionen kan modelleres korrekt.

Linjetab for eksisterende samling med ydervæg med 75 mm isolering og loftskonstruktion med 100 mm isolering:

De gennemsnitlige varmestrømme er:

$$Q_{\text{med spær}} = 33,06$$

$$Q_{\text{uden spær}} = 22,86$$

Den gennemsnitlige varmestrøm ved vægtning af spær/isolering:

$$Q_{\text{middel}} = 0,063 \cdot 33,06 + 0,937 \cdot 22,86 = 23,50 \text{ W/m}$$

De én-dimensionale fradrag for ydervæg og loftskonstruktion:

$$Q_{\text{fradrag, væg}} = 0,505 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1 \text{ m} \cdot (20 - 0)^\circ\text{C} = 10,11 \text{ W/m}$$

$$Q_{\text{fradrag, loft}} = 0,421 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot (20 - 0)^\circ\text{C} = 12,63 \text{ W/m}$$

Linjetabet bliver således:

$$\Psi_{sa} = \frac{23,50 \text{ W/m} - 10,11 \text{ W/m} - 12,63 \text{ W/m}}{20^\circ\text{C}} = 0,038 \approx 0,040 \text{ W/mK}$$

Tilsvarende bliver linjetabet for samling med efterisoleret ydervæg med 195 mm isolering og loftskonstruktion med op til i alt 400 mm.

$$\Psi_{sa} = \frac{7,74 \text{ W/m} - 2,92 \text{ W/m} - 2,91 \text{ W/m}}{20^\circ\text{C}} = 0,096 \approx 0,10 \text{ W/mK}$$

8 INDSATSOMRÅDE 6 - LUFTTÆTNING

Eksisterende bygningers klimaskærm er langt fra niveau for lufttæthed af nye bygninger. Det gælder også for parcelhuse fra 1960/70'erne. Lufttætheder forekommer erfaringsmæssigt primært i lofter, samlinger mellem lofter og ydervægge, gulve over kryberum, vinduer i form af selve vinduet og kalfatringsfugen samt gennembrydninger for installationer.

Fordelene ved at tætnes klimaskærm er mange:

- Lavere energiforbrug
- Færre trækgener
- Mulighed for at styre ventilationen efter behov
- Mindsket risiko for fugtskader som følge af kondensering af fugtig indeluft i klimaskærmen.

En tæt klimaskærm er desuden helt afgørende for energieffektiviteten af mekanisk ventilation med varmegenvinding, hvor det er vigtigt at luftskiftet går gennem varmeveksleren og ikke via klimaskærmen. Samtidig er det ofte nødvendigt at indføre mekanisk ventilation hvis huset tætnes, da det ellers kan give problemer med indeklimaet når infiltrationen reduceres.

8.1 Målinger af klimaskærmens lufttæthed

Der findes to metoder til at bestemme luftskiftet gennem klimaskærmen (infiltration) under normal brug af bygningen – direkte ved sporgas målinger eller indirekte baseret på en trykprøvning. Begge metoder er beskrevet nedenfor.

8.1.1 Sporgasmålinger

Den direkte metode er måling af infiltrationen ved hjælp sporgas, som er "snapshot" målinger under de fremherskende vejrforhold. Hvis man har mulighed for at måle over en længere og vejrmæssigt repræsentativ periode i fyringssæsonen uden beboere i huset, vil man kunne få en ret præcis værdi for klimaskærmens lufttæthed og infiltrationen q_n . Der findes forskellige metoder til at måle luftskiftet (Dansk Standard, 2013), som kræver fuld opblanding i den målte zone, hvilket kan sikres med brug af ventilatorer. Hvor beboer- eller brugeradfærd ikke kan påvirke måleresultatet kan det anbefales at bruge den passive metode og måling efter konstant emissionsprincippet.

8.1.2 Trykprøvning

Praktiske målinger af utætheder i klimaskærmen udføres på grundlag af den såkaldte *blower door* metode (BYG-ERFA, 2013; Dansk Standard, 2001), hvor klimaskærmens tæthed bestemmes ved trykprøvning med 50 Pa.

Metoden omfatter at en større åbning i klimaskærmen (typisk en dør) midlertidigt erstattes af en lufttæt ramme med indbygget ventilator. Ventilatoren kan skabe enten over- eller undertryk og ved at måle sammenhængende værdier af trykforskellen over klimaskærmen og volumenstrømmen gennem ventilatoren, kan klimaskærmens tæthed karakteriseres. Ifølge BR2010 skal resultatet af trykprøvningen angives i enheden l/s pr. m² opvarmet etageareal, svarende til størrelsen w_{50} , som anført i DS/EN 13829 (Dansk Standard, 2001), og skal udtrykkes som gennemsnittet af måling ved hhv. over- og undertryk ved 50 Pa.

Det er netop trykprøvningsresultatet som bygningsreglementet stiller krav til i forbindelse med nye bygninger. I nye bygninger bygget efter BR 2010 må volumenstrømmen ikke overstige 1,5 l/s pr. m² opvarmet etageareal eller 1,0 l/s/m², hvis det er en lavenergibygning. Kravet til passivhuse angives i enheden luftskifte og er 0,6 gange i timen, som svarer til en volumenstrøm på 0,3-0,4 l/s/m².

Trykprøvningen kan ikke alene bruges til lokalisering af utætheder. Det er derfor almindeligt i forbindelse med tæthedsprøvning, at foretage termografering og måling af luftens strømningshastighed ved utætheder, som grundlag for eventuelle tiltag til forbedring af klimaskærmens lufttæthed. Termografering foretages efter DS/EN 13187 (Dansk Standard, 1999).

8.1.3 Infiltrationen

Trykprøvningsresultatet kan konverteres til en gennemsnitlig årlig infiltration - som kan benyttes i beregninger af det årlige energibehov med f.eks. programmet Be10 - ud fra hvor beskyttet bygningen er placeret og hvor mange facader der er eksponeret for udeklimaet. Fritliggende parcelhuse har mere end én eksponeret facade, og for dette tilfælde angiver europæiske standarder (Dansk Standard, 2007, 2008) at infiltrationen kan beregnes ved at multiplicere q_{50} med den relevante af følgende koefficienter:

- Hus i åbent land 0,10
- Hus i moderat beskyttet omgivelser (f.eks. forstæder) 0,07
- Hus i beskyttede omgivelser (f.eks. bymidte, skovområde) 0,04

SBi anvisning 213 vedrørende bygningers energibehov, som omfatter beregningsprogrammet Be10 og en beregningsvejledning/metodebeskrivelse, angiver en generel formel for alle bygninger og placeringer til bestemmelse af infiltrationen, som også dækker tilfældig åbning af vinduer og døre i forbindelse med brug af bygningen:

$$q_n = 0,04 + 0,06 \cdot w_{50} \quad (l / s \text{ pr. } m_2)$$

Denne formel giver værdier for infiltrationen, der er noget på den sikre side for små værdier af w_{50} , sammenlignet med moderat beskyttet hus iht. europæiske standarder, og god overensstemmelse ved høje værdier af w_{50} . Anvisningen angiver samtidigt, at for huse med balanceret mekanisk ventilation skal infiltrationen q_n umiddelbart betragte som et ekstra luftskifte, oven i den mekaniske ventilation q_m .

Infiltrationen har betydelig indflydelse på energibehovet. Det årlige varmetab ved infiltration E_n , kan på baggrund af ovennævnte formel for bestemmelse af infiltration og udeklimadata (DRY) beregnes på følgende vis:

$$E_n = 110 \cdot q_n = 4,4 + 6,6 \cdot q_{50} \quad (kWh / m^2 / \text{år})$$

Infiltrationstabet andrager altså ca. 11 kWh/m² pr. år pr. 0,1 l/s pr. m² infiltration. Hvor meget ændringer i infiltrationstabet slår igennem på energibehovet afhænger af gratisvarmetilskuddet til huset mv. og kan være noget mindre end angivet.

De fleste parcelhuse har betydelige lufttætheder i klimaskærmen og det er ikke ualmindeligt med luftskifter på op til cirka 8 l/s/m² ved trykprøvning med 50 Pa. Niveauet 1,0 l/s/m² vil formentlig være opnåeligt i de fleste vidtgående energirenoveringer af parcelhuse og svarer til en infiltration på 0,1 l/s pr. m² et årligt infiltrationstab på 11 kWh/m².

Åbning af vinduer og døre er ikke nødvendigt for at opretholde et godt indeklima i huse med mekanisk ventilation. Hvis husejeren instrueres i at undlade åbning af vinduer/døre i fyringssæsonen, så vil det være rimeligt i praktiske energiberegninger (ikke i officielle energirammeberegninger) at se bort fra første led i formelen, så infiltrationstabet reduceres til 6,6 kWh/m². Varmetabet ved ventilation med et typisk grundluftskifte på 0,30 l/s/m² og temperaturvirkningsgrad på 80 % er til sammenligning også 6,6 kWh/m².

Det er altså helt afgørende for en god og samlet set energieffektiv ventilationsløsning, at der måles på klimaskærmens lufttæthed både før, under og efter energirenovering, så det sikres at infiltrationen minimeres og om muligt til niveau for nye lavenergibygninger. Samtidigt er det også vigtigt at elforbruget minimeres ved brug af energieffektive ventilatorer og udformning af et kanalsystem med lille tryktab.

8.2 Lufttætningsmetoder

Infiltrationen er en "udførelsesegenskab", knyttet til den måde, en konstruktion eller samplingsdetalje er udført på. En lufttæt klimaskærm opnås ved f.eks. at anvende en membran/dampspærre, ofte i form af en plastfolie, til at sikre tæthedsplanet i lette ydervægge og loftkonstruktioner mv. I traditionelle tunge ydervægge ligger tætheden i bagmuren og især overfladebehandlingen. Det er afgørende at samlinger mellem bygningsdele og membraner udføres lufttætte. For at undgå risiko for kondensation, er

hovedreglen for placering af en dampspærre, at den ikke må ligge mere end 1/3 del inde i konstruktionen/isoleringen fra den indvendige side.

8.2.1 Udvendig tætning 1 plan hus med gitterspær

Udvendig lufttætning på eksisterende ydervægge og lofter er relevant ved samtidig efterisolering med en vis tykkelse, så tæthedsplanet fortsat befinder sig fugtteknisk korrekt, på den varme side af dampspærren. Fordelen ved konceptet er at alt arbejdet gøres udefra og derfor ikke generer beboerne og at man f.eks. ikke behøver gøres tiltag i forhold til utætte eksisterende eludtag på indersiden af ydervæggen. Til gengæld er det især en udfordring at udføre tætte samlinger omkring spærfagets tænger. Figur 26 viser et 1 plan hus med gitterspær, hvor det omtalte udvendige koncept til lufttætning er anvendt.



Figur 26. Dampspærre på loft (tv) og fastgørelse og tætning mod ydervæggens øvre del samt lufttæt forbindelse med de nye vinduer og ydervæggen (th). Billeder: Projektlavenergi.dk

Tætning af loftet kræver at tagrummet ryddes og at der udføres en tæt dampspærre/plastfolie ovenpå de eksisterende spærfodder/isoleringen. Plastfoliebanerne udlægges med en afstand svarende til spærafstanden, så spærfoden kan bruges som modhold for tape til sikring af tætte plastfolie samlinger. Tilslutning til tængerne er en særlig udfordring og gennemføringer for ventilationskanaler skal etableres lufttætte. Plastfolien føres igennem ved tagfod, bukket ned ad ydervæggens yderside og fastgøres lufttæt. Skalmuren tættes i nødvendigt omfang.

Hvis den eksisterende ydervæg er en let skeletvæg, så vil det formentlig være passende at fjerne beklædningen, eventuelt udskifte isoleringen og etablere dampspærre på hele stolpeskelettet og en passende underlagsplade for en facadeefterisolering.

Omkring vinduer og døre etableres der en tæt forbindelse til den eksisterende ydervæg, f.eks. som vist i Figur 26, når der anvendes en selvbærende facadeløsning, mens der for skeletløsninger som f.eks. Isover Plus System anvendes normal fuge/tætning mellem vindue og en plade, som etableres i flugt med vinduesfalsen, hvor også vinduet kan fastgøres.

For at undgås problemer med kondensation af fugtig indeluft i konstruktionerne, så bør efterisoleringstykkelsen være minimum to gange større end den samlede eksisterende isoleringstykkelse. Dette krav kan i de fleste tilfælde klares med at isolere op til 400 mm i loftet og anvende 200 mm mineraluld på facaden.

8.2.2 Udvendig tætning af 1½ plan hus

Udvendig lufttætning af 1½ plan huse vil være relevant, når taget trænger til udskiftning. I den situation bør tagets isolering forbedres og det åbner op for muligheden at etablere en dampspærre på den udvendige side af de eksisterende spær. Udvendig efterisolering og tætning i hele den skrå tagflade resulterer i en varm skunk og tagrum over hanebåndet og dermed nye muligheder for udnyttelse af skunken og frilægning hanebjælker mv.

8.2.3 Indvendig tætning af ydervægge

I traditionelle tunge ydervægge ligger tætheden i bagmuren og især overfladebehandlingen. Eldåser, friskluftindtag mv. udgør væsentlige kilder til utætheder. Friskluftindtag er relativt nemmere at forsegle, mens eldåser er problematiske, da de typisk gennembyder bagmuren og dermed tæthedsplanet. Fordelen ved et udvendigt koncept for lufttætning er netop især at man løser problemet omkring eldåser og at beboerne kan blive i deres hus relativt uforstyrret.

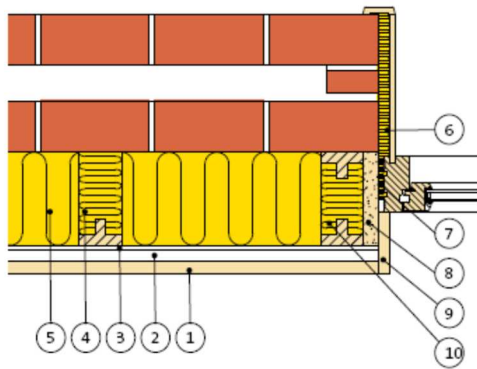
8.2.4 Indvendig tætning af samlinger omkring vinduer og døre

Metode for tætning omkring vinduer og døre afhænger af om der udføres vindues- og facadetiltag.

- Hvis vinduer/døre skiftes uden facadeisolering, kan tætningen udføres helt traditionelt.

Hvis der samtidig udføres facadeisolering og nye lysninger afhænger tætningen af typen af facadeisoleringssystem:

- Hvis facadeisoleringen udføres med direkte fastgørelse til den eksisterende ydervæg, så må de nye vinduer/døre monteres i den eksisterende mur. Tætning kan i dette tilfælde etableres med f.eks. en plastfolie forbindelse mellem vinduet/døren og den eksisterende
- Hvis facadeisoleringen udføres i skeletkonstruktion, så kan vinduer/døre monteres i underlagsplade i flugt med vinduesfalsen og med tæt tilslutning til den oprindelige ydervæg. Der kan udføres en normal fugetætning mellem vindue og ydervæg.



Figur 27. Eksempel på facadeisolering udført i "skeletkonstruktion" (Isover Plus System) og vinduesmontering i underlagsplade i flugt med vinduesfalsen.

8.2.5 Nyt tæt loft

Lofter i 1960/70'erne huse er typisk meget utætte. Dette skyldes primært alderen og udførelsen af dampspærren, manglende tæthed ved overgang til ydervægge og at den typisk er placeret relativt ubeskyttet, umiddelbart bag ved loftbeklædningen, så den over tid kan være blevet perforeret ved udførelse af elinstallationer mv. Korrekt udbedring af utætte lofter kræver typisk omfattende arbejder, f.eks. demontering af lofter og køkkenskabe. Hvis utætheder ikke kan udbedres, bør der opsættes ny dampspærre.

8.2.5.1 Installationsloft

Denne metode medfører helt nye lofter og at kræver at huset tåler at rumhøjden reduceres en smule. Den omfatter demontering af lofter, dampspærre mv., samt opsætning af et nyt såkaldt installationsloft med en ny tæt dampspærre et stykke inde i loftskonstruktionen, så den er godt beskyttet mod utilsigtet (eller tilsigtet) perforering under udførelse af elinstallationer som kabelføringer, lampeudtag mv. Elinstallationerne kan så let anbringes på den varme side af dampspærren.

8.2.5.2 Tætning af loft med andre metoder

Et mindre omfattende alternativ er at etablere nye lofter med en ny og helt tæt dampspærre uden at fjerne den eksisterende loftsbeklædning og dampspærre. Gipslofter er populære som ny loftsbeklædning og i den forbindelse kan man nøjes med ét lag gips, hvis det eksisterende loft er tilstrækkeligt plant. Med hensyn til den gamle dampspærre, så skal det blot sikres at den ikke ligger mere end 1/3 inde i isoleringen.

8.2.5.3 Beholde loft med tæt dampspærre (tætning af overgang til ydervæg)

Hvis der tidligere er blevet renoveret med nye lofter og dampspærre, kan selve loftsfladen være ganske lufttæt, men ofte ses det at overgangen mod ydervæg ikke tilsvarende er lufttæt. I sådanne tilfælde må man forsøge at etablere en tæt forbindelse mellem yderste forskallingsbrædder/-lægter og ydervægge/indervægge via manchetter, tape og/eller fugemasse og afsluttet med en skyggeliste.

8.2.6 Tætte gennembrydninger for ventilationskanaler

Tætte gennembrydninger for ventilationskanaler er en vigtig detalje. Det er også vigtigt at sikre at loftsisoleringen efterfølgende slutter tæt mod kanalerne. Gennembrydninger for ventilationskanaler kan udføres tætte ved følgende metoder (se Figur 28):

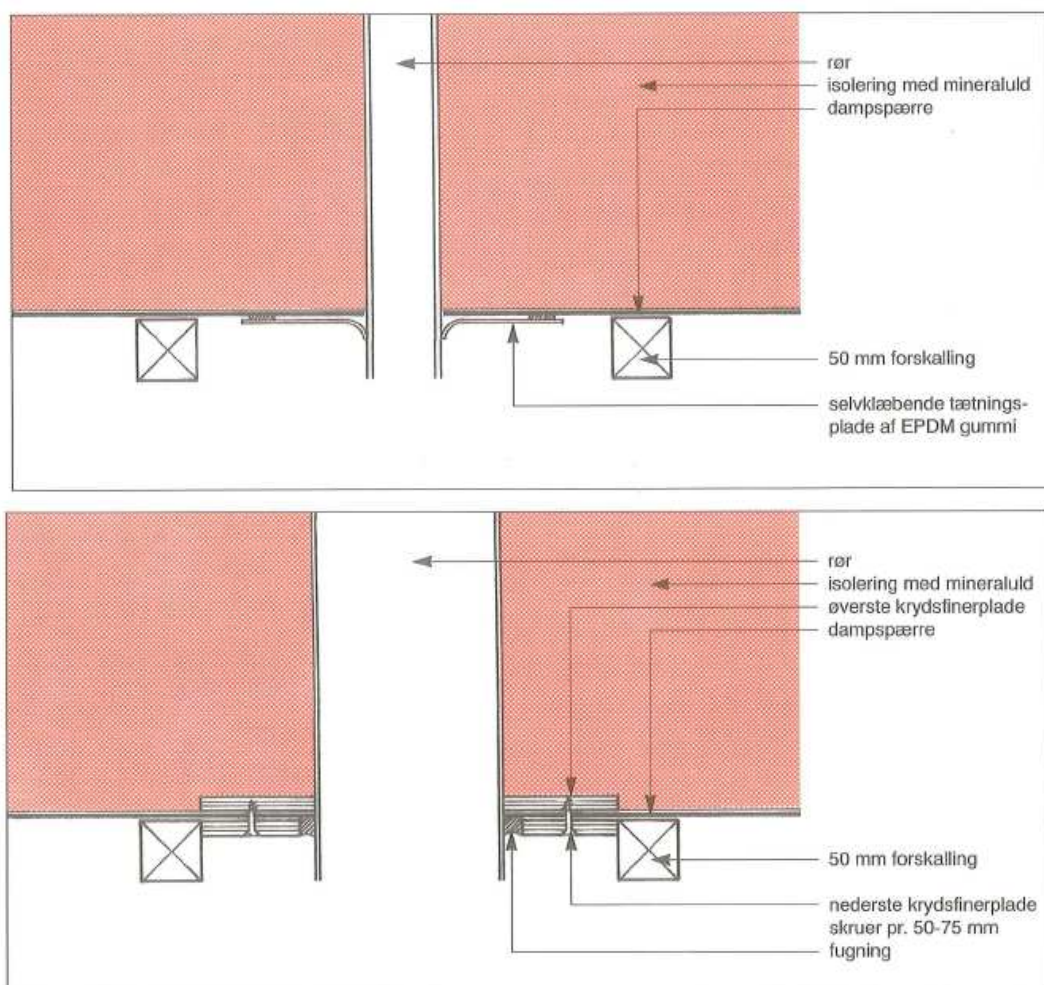
- Tætningsmanchetter/krave løsning
- Fast underlag

Ad 1: Der udføres et hul i dampspærren svarende til kanaldimensionen. Manchetteren vælges med en dimension der passer til kanaldimensionen, trykkes fast på dampspærren nedefra og ventilationskanalen trykkes ned gennem manchetteren oppefra.

Denne metode er relevant, når loftet ikke renoveres.

Ad 2: Der monteres en plade mellem to spærflader, så undersiden af pladen flugter med undersiden af spærfladerne. Der udføres udskæring i pladen svarende til kanaldimensionen, dampspærren monteres under spærfladerne, der skæres ud i dampspærren præcist svarende til kanaldimensionen og kanalen monteres. Der fastgøres en plade til den øverste, hvor der er udskåret et hul der lidt større i den øverste plade, så der er plads til en fuge mod kanalen.

Denne metode er relevant især ved nyt installationsloft, hvor eksisterende loft og gammel dampspærre fjernes. Hvis der udføres nyt loft på eksisterende loft, kan det eksisterende loft fungere som det fast underlag.



Figur 28. Gennemføringer for ventilationskanaler kan udføres lufttætte med enten krave eller fast underlag.

8.2.7 Tætning af kold ventileret krybekælder

Lufttætning af en kold ventileret krybekælder med dæk udført som træbjælkelag kan udføres på forskellig måde i forbindelse med efterisolering:

- Hvis gulvbelægningen skiftes: Der monteres en dampspærre under den nye gulvbelægning, hvorved der bedst kan opnås en tæt dampspærre.
- Hvis gulvbelægningen ikke skiftes: Der monteres nedefra en dampspærre mellem bjælkerne, hvilket dog ikke er nemt at udføre.
- Hvis gulvbelægningen ikke skiftes, alternativ: Efterisoleringen afdækkes med en lufttæt, men diffusionsåben plade, så fugt kan diffundere ud i krybekælderen og ventileres bort.

Der gælder for alle tre metoder at dampspærren skal være med lufttætte samlinger, tilslutninger mod ydervæg og gennemgående skillevægge.

Efterisolering og tætning af krybekældre nedefra kræver at den er 600 mm høj eller derover. Ofte er den bedste og eneste mulighed for at forbedre en traditionel kold krybekælder at ændre den til terrændæk, da det i praksis er umuligt eller dyrt at udføre arbejdet. Hvis der ændres til terrændæk, kan der etableres en effektiv isolering mod jord og fundamenter samt et luft- og radontæt betondæk efter samme retningslinjer som i nye bygninger.

9 ISLERINGSMATERIALER

Der redegøres kortfattet for egenskaber af de mest almindelige traditionelle isoleringsmaterialer og nogle nye lovende isoleringsmaterialer med bedre isoleringsegenskaber. Materialer med lavere varmeledningsevne er interessant i energirenoveringssammenhæng, da man kan opnå fordele i form af reduceret arealforbrug mv. Regler for brandklassificering og brandmæssige begrænsninger for anvendelse af brændbart skum isolering omtales sidst i kapitlet.

9.1 Mineraluld

Mineraluld er baseret på naturlige materialer som sten og glas, som knuses og omsmeltes til f.eks. isoleringsbatts i form af stenuld eller glasuld. Mineralulden indeholder en fiberstruktur, som først og fremmest isolerer godt i kraft af den stillestående luft, som er imellem fibrene i isoleringen. Fiberstrukturen gør også isoleringen robust og praktisk at anvende. Isoleringen har endvidere en vandvisende og brandhæmmende effekt. Mineraluld kan klare en belastning på op til 30 kPa. Varmeledningsevne ligger i intervallet 32 – 40 mW/mK afhængig af anvendelse og kvalitet.

9.2 Polystyren (EPS/XPS)

Polystyren er et termoplastisk celleplastmateriale. Der findes to forskellige typer; ekspanderet polystyren (EPS) og ekstruderet polystyren (XPS), som har omtrent samme isoleringsevne som mineraluld. Polystyren er generelt kendetegnet ved stor trykstyrke og kapillarbrydende effekt, og er derfor velegnet, når der stilles krav til trykstyrke og lav fugtoptagelse, f.eks. i terrændæk, kælderydervægge, fundamenter og flade tage. Samtidig betyder den lave vægt, at materialet er nemt at håndtere. XPS anvendes når der er særlige krav til trykstyrke og robusthed, f.eks. som sokkelisolering i forbindelse med udvendig facadeisolering. Anvendelse af EPS med puds udvendigt på eksisterende ydervægge (fremtidige brandbestemmelser åbner måske op for dette) er primært hensigtsmæssigt på mineralske ydervægge uden organiske materialer, idet udtørringen af eventuelt indtrængende fugt fra f.eks. revner i pudslaget er besværliggjort af diffusionsmodstanden i celleplasten.

9.3 Polyurethan (PUR)

Polyurethan, også kaldet PUR, er et opskummet plastmateriale, der pga. sin meget lave varmeledningsevne er et af de mest effektive isoleringsmaterialer der er på markedet i dag. Isoleringsevnen opstår igennem en proces hvor man anvender et opskumningsmiddel/drivgas så materialet danner lukkede celler der indeholder en isolerende gas. Det er et meget let materiale, og på grund af den høje isoleringsevne, kan

man ofte nøjes med små tykkelser for at opnå det ønskede resultat. I byggeriet anvendes produktet eksempelvis i hulmursisolering, isoleringsplader og blokke.

9.4 Polyisocyanurat (PIR)

Stift skum fremstillet på basis af polyisocyanater bliver generelt beskrevet som polyurethan (PUR), urethan eller polyisocyanurat (PIR) skum. PIR-skum udmærker sig ved sin modstandsevne overfor høje temperaturer og sin relative lave brændbarhed. PIR skum til bygningsisolering produceres med designvarmeledningsevne ned til 22 mW/mK. Et konkret produkt til udvendig facadeisolering (Therma TW53 fra Kingspan) har λ_D -værdi på 25 mW/mK ved tykkelse på over 120 mm. PIR er som polystyren brændbart (klasse E,s2-d0, se evt. afsnit 9.8.1). Isoleringsplader af PIR anvendes i dag typisk til vægge, gulve eller tage i større bygninger. PIR har gode fugtmæssige egenskaber og kan f.eks. anvendes i de fleste tilfælde mod jord, hvor EPS benyttes. Der kan dog være behov for en membran. PIR skum har bedre trykstyrke end PF skum, som omtales nedenfor.

9.5 Fenolskum (PF)

Fenolskum eller Phenolic Foam (PF), har den bedste isoleringsevne af alle celleplast. PF skum har en λ_D -værdi på 21 mW/mK i pladetykkelser på over 44 mm og inkl. effekt af tab af isoleringsevne over tid). 10 cm PF isolerer altså lige så godt som ca. 18 cm almindelig mineraluld med λ -værdi på 37 mW/mK. PF skum er et hårdt, men også sprødt materiale, som der skal tages hensyn til ved fastgørelse udvendigt på en ydervæg. De brandmæssige egenskaber af PF skum er gode og materialet opnår klassificering mellem B,s1-d0 og C,s2-d0, se evt. afsnit 9.8.1. PF skum i bedste brandklasse vil kunne anvendes uden at der stilles yderligere krav ud fra brandhensyn.

9.6 Celleglas

Celleglas anvendes som isolering, hvor der stilles ekstraordinære krav til fugttekniske egenskaber og ikke mindst trykstyrke. Celleglas fås med trykstyrke fra 400 kPa og helt op til 1600 kPa. Celleglas har en varmeledningsevne som afhænger af trykstyrken og λ_D -værdien ligger i intervallet 32 – 40 mW/mK. Celleglas anvendes typisk i specielle konstruktioner som frysehuse og parkeringsdæk, men vil potentielt kunne finde anvendelse i forbindelse med energirenovering, f.eks. som kuldebroafbryder (under bagmure mv.).

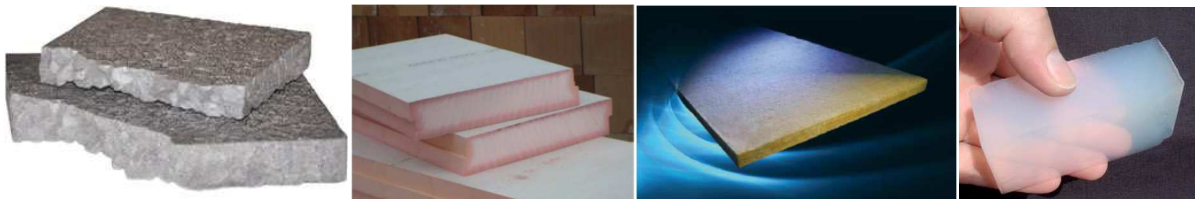
9.7 Nye højisolerende materialer

Der findes en række ”nye” højisolerende materialer/produkter med relevans for energirenovering af eksisterende huse (se Figur 29):

- EPS med grafit (Sundolitt Climate) – forhandles i Danmark af Sundolitt A/S.

- Stenuld med aerogel (Aerowolle). Materialet indgår i systemløsningen AeroRock til indvendig facadeisolering, som produceres af Rockwool og som indtil videre kun forhandles i Tyskland.
- Aerogel (Spaceline) – forhandles i Danmark af Thermisol A/S.
- Vakuumpaneler (Vacupor) – forhandles i Danmark af Barsmark A/S.

Vakuumpaneler er ikke et decideret materiale, men et system bestående af et finkornet materiale anbragt i vakuum i en omsluttende forsejlet folie.



Figur 29. Eksempler på "nye" isoleringsmaterialer med lavere varmeisoleringssevne end traditionelle materialer; EPS med grafit, PF, komposit af stenuld og aerogel og ren aerogel.

9.8 Brand

Brændbar skumisulering til efterisolering af ydervægge er et alternativ til traditionelle mineraluldsuløsninger. Blandt andet derfor er det relevant at redegøre for hvordan isoleringsmaterialer klassificeres brandmæssigt og hvilke begrænsninger der er til anvendelsen.

9.8.1 Klassificering

Isoleringsmaterialers reaktion på brand inddeles i følgende nye europæiske klasser: A1, A2, B, C, D, E, F. Klasse A1 er højeste kravniveau, som ikke kan kombineres med tillægsklasser. Klasse A2, B, C, D kombineres altid med tillægsklasse for røg (s) og brændende dråber (d).

Der anvendes følgende betegnelser:

s1: meget begrænset mængde af røgudvikling

s2: begrænset mængde af røgudvikling

s3: intet krav til mængde af røgudvikling

d0: ingen brændende dråber eller partikler

d1: brændende dråber eller partikler i begrænset mængde

d2: intet krav til mængde af brændende dråber eller partikler

Klasse E kan enten stå alene eller kombineres med d2

Klasse F indebærer ingen krav og kan ikke kombineres med tillægsklasser.

Den hidtidige danske betegnelse for A2,s1-d0 var ubrændbart, B,s1-d0 = klasse A og D,s2-d2 = klasse B.

Mineraluld er brandklasse A1 eller A2, som betyder at materialet enten ikke medvirker til brand (A1) eller medvirker yderst begrænset (A2). PF isolering klassificeres mellem B,s1-d0 og C,s2-d0, PIR er typisk klasse E,s2-d0, mens EPS/XPS almindeligvis er klasse F, men kan være bedre med brandhæmmere.

9.8.2 Begrænsninger

Bygningsreglementet BR 2010 (kapitel 5) stiller et eksplicit krav til isoleringsmaterialer, der indgår i bygningskonstruktioner. Hvis et isoleringsmateriale (uden nogen former for belægning), som påtænkes anvendt til f.eks. udvendig facadeisolering, dokumenteres at opfylde kravene til klasse A1, A2 eller B,s1-d0, så stilles der ikke yderligere krav ud fra brandhensyn. Opfylder materialet ikke mindst klasse B,s1-d0 (klasse A), men mindst klasse D,s2-d2 (klasse B), så gælder de almene bestemmelser i *Eksempelsamling om brandsikring af byggeri* (Energistyrelsen, 2012). For dårligere brandklasser gælder at de kan anvendes i mange tilfælde, hvis de er passende lukket inde i brandsikre materialer som angivet i eksempelsamlingen. Dette lukker markedet op for nogen af de nyere former for isolering.

9.9 Sammenfatning af egenskaber

I Tabel 11 findes en oversigt med generelle egenskaber; trykstyrke, diffusionstal og brandklasse. Diffusionstallet D udtrykker vanddampgennemtrængeligheden, hvor en lille værdi angiver en stor modstand mod vanddampdiffusion.

Tabel 11. Egenskaber af forskellige isoleringsmaterialer til energirenovering.

EGENSKABER FOR ISOLERINGSMATERIALER						
Materiale	λ -værdi	λ_D^1	Densitet	Trykstyrke	D-værdi ²	Brand-klasse
	mW/mK	mW/mK	kg/m ³	kPa	µg/m/s/Pa	Euroklasse
Mineraluld	32-40	37 ³	10-120	maks. 30	0,14	A1/A2
EPS	34-41	38 ⁴	15-40	60-250	0,0035	F
XPS	34-37			200-500	0,0011	F
PUR	22-27		20-60	420		D-s2,d2 ⁵
PIR	22-27	25 ⁶	Ca. 30			E,s2-d0
PF	21	21 ⁶	60-160			B,s1,d0
Celleglas, plade	38-50		105-165	400-1600	0,0001	
EPS m. grafit	31	31				
Stenuld+aerogel	19	19				
Aerogel	14	14	30-300			
Vakuumpaneler	5 ⁷	6-8	150-300	?		

¹ Designværdien for varmeledningsevnen for typiske isoleringsmaterialer (tør konstruktion)

² Fugttransporten ved diffusion beregnes som vanddampens partialtrykforskel målt mellem de to sider af materialet divideret med Z -værdien. Z -værdien, som udtrykker modstanden mod vanddampdiffusion, kan beregnes som materialetykkelsen divideret med D -værdien.

³ Værdi for facadebatts til løsninger med puds

⁴ Værdi for terrændæk

⁵ Ikke alle typer PUR opfylder dette brandkrav

⁶ Værdi for facadeplader

⁷ Centerværdi på 5 mW/mK ved tryk på 1mbar. Ved perforering og atmosfærisk tryk er λ -værdien 19 mW/mK. Det er ikke muligt at opretholde vakuum over tid, så der regnes med en designværdi på 6-8 mW/mK.

10PAKKELØSNINGER

Når det kommer til at beslutte en renovering af et parcelhus er der mange faktorer der spiller ind og påvirker valget. Mange husejere vælger at renovere lidt ad gangen efterhånden som behovet opstår og pengene er der. Men der kan være en del at vinde ved at indføre flere energiforbedringer på en gang, da det giver mulighed for at integrere forbedringerne med hinanden og skabe større tæthed. Desuden vil det give en enklere byggeproces da man kun skal have håndværkere af en omgang, hvilket reducerer behovet for at åbne konstruktionerne flere gange og herudover minimerer udgifterne til administration, transport osv. Det kræver dog en større investering, hvilket kan være en barriere for mange husejere.

Når man taler om pakkelsninger er det også vigtigt at kigge på det enkelte hus og se hvad det reelle renoveringsbehov er. Jo mere konstruktionerne trænger til udskiftning, des mere fornuftig er hele energirenoveringen. Her skal man også tænke husejernes funktionelle behov ind, om huset har de rum og den indretning der er brug for.

En renovering bør også foretages i en fornuftig rækkefølge. Det vil altid være en fordel at starte med at optimere klimaskærmen og dermed reducere varmetabet før man går ind og moderniserer installationerne. Ellers risikerer man f.eks. at stå med et nyt men overdimensioneret varmesystem. For at opnå en fornuftig renovering er forskellige energirenoveringstiltag blevet sammensat i tekniske pakkelsninger. Der er defineret følgende relevante pakkelsninger:

- **Basispakke: Tag + Vinduer/døre + Facade.**
Denne pakke vil resultere i betydelige energibesparelser, men vil ikke bringe energibehovet på niveau med niveau for nye huse opført til minimumskravene i BR2010.
- **Pakke BR2010: + Tætning og ventilation (vgv)**
Denne pakke bringer huset på energimæssigt niveau med nye huse og omfatter udover efterisolering af tag, vinduer og facade, at huset tætnes og at der installeres energieffektiv mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding.
- **Pakke BR2015: + Energiforsyning + Terrændæk**
Den store løsning bringer huset på energimæssigt niveau med lavenergibygning klasse 2015, som angivet i BR2010. Dette kræver en energieffektiv energiforsyning med minimalt varmetab og eventuelt efterisoleringstiltag for terrændæk eller ændring fra krybekælder til terrændæk.

Alle pakker omfatter varmebesparelser i form af lavtemperaturdrift, som er en følgevirkning af den isoleringsforbedrede klimaskærm, som betyder, at radiatorsystemet kan yde tilstrækkeligt med varme selv om det drives ved lavere temperatur, hvilket medfører et reduceret varmetab fra varmfordelingsrør.

10.1 Beregningseksempel: Pakke BR2010

For at demonstrere effekten af en renoveringspakke er der her lavet et beregningseksempel. Til beregningen er benyttet et typisk parcelhus, beskrevet i Bilag 1: 1960/70'ers parcelhuse. De benyttede inddata for huset kan ses i Tabel 12. Resultaterne for de forskellige tiltag er vist i Tabel 13 og de vigtigste resultater for pakken BR2010 er vist i Tabel 14.

Varmetabet Q_{tab} angiver varmetab pr. m^2 bygningsdel (for ventilation er det pr. m^2 bruttoareal af hus). Varmetabet for vinduer er beregnet som E_{ref} med modsat fortegn – der optræder et negativt varmetab, hvilket svarer til at solindfaldet er større end varmetabet i fyringssæsonen. E-faktor er energirenoveringsfaktoren. Den afspejler f.eks. for ydervæggen at 50 % af investeringen alligevel skulle være afholdt til nødvendig renovering. Den højere faktor for yderligere efterisolering svarer til en merpris på 20%.

Tabel 12. Inddata benyttet til beregningseksemplet.

INDDATA TIL BEREGNING			
	Symbol	Værdi	Enhed
Ydervægge (indv mål)		76	m^2
Vinduer/døre		34	m^2
Tag/loft (indv mål)		122	m^2
Terrændæk		122	m^2
Fundamenter		0,55	m/m^2 væg
Vindue-væg samlinger		0,75	m/m^2 væg
Væg-tag samlinger		0,4	m/m^2 væg
Gradtimer - væg og tag	G, ude	90	$\text{kKh}/\text{år}$
Gradtimer - terrændæk	G, jord	63	$\text{kKh}/\text{år}$
Økonomisk levetid	n	30	år
Realrente	r	2,5	pct p.a.
Annuitetsfaktor	a(n,d)	0,048	-
Varmepris, nuv. pris		0,8	kr/kWh
Varmepris, x 2		1,6	kr/kWh

Tabel 13. Varmetabsberegning og økonomi for de forskellige bygningsdele, reference og udvalgte tiltag.

VARMETAB									
Bygnings- del		Efter- isolering	U	Ψ _{fundament}	Ψ _{vind- væg}	Ψ _{tagfod}	U _{effektiv}	Q _{tab}	
		mm	W/m²K	W/mK	W/mK	W/mK	W/m²K	kWh/m²/år	
A1	Ydervæg	Ref	0,500	0,70	0,09	0,08	0,97	87	
A2		195	0,126	0,35	0,03	0,04	0,35	31	
A3		290	0,096	0,30	0,03	0,03	0,29	26	
B1	Tag	Ref	0,400			0,08	0,42	37	
B2		100	0,180			0,04	0,19	17	
B3		200	0,130			0,04	0,14	12	
B4		300	0,100			0,03	0,11	10	
			U _w	g _w					
C1	Vinduer	Ref	2,800	0,50				155	
C2		Energi	1,400	0,50				28	
C3		Lav-E	0,800	0,40				-6	
			q _m	n _{,vgv}	q _{i,n}	SEL			
			l/s/m2	-	l/s/m2	kJ/m3			
D1	Ventilation	Ref	0,000	0,00	0,30	0,0		33	
D2		Vent 1 ¹	0,300	0,80	0,13	1,0		21	
D3		Vent 2 ²	0,300	0,90	0,09	0,6		13	
ØKONOMI									
ΔE _{årlig}		ΔE _{drift,el,årlig}	n _t	ΔVO _{årlig}	I _{total}	I _{total}	E- faktor	I _{tiltag}	ESP
kWh/m²/år r		kWh/m²/år r	År	Kr./år	Kr./m ²	Kr.		Kr.	Kr./kWh
A2	56	0	40	0	2000	152.000	0,50	76.000	0,64
A3	61	0	40	0	2000	152.000	0,70	106.400	0,82
B2	21	0	40	0	240	29.280	1,00	29.280	0,42
B3	25	0	40	0	320	39.040	1,00	39.040	0,46
B4	28	0	40	0	400	48.800	1,00	48.800	0,51
C2	127	0	30	0	3000	102.000	0,50	51.000	0,57
C3	161	0	30	0	3000	102.000	0,70	71.400	0,62
D2	12	2,6	25	250	300	40.500	0,50	20.250	1,88
D3	20	1,6	25	250	300	40.500	0,70	28.350	0,87

1) Mekanisk ventilation som overholder BR2010

2) Mekanisk ventilation lavenergisystem

Tabel 14. Resultat af beregningseksempel for pakke BR2010

RESULTAT FOR PAKKELØSNING						
Bygningsdel			$\Delta E_{\text{årlig}}$	I_{total}	I_{tiltag}	ESP
			kr/år	kr	kr	Kr/kWh
A2	Ydervæg	195 mm	3.390	152.000	76.000	0,64
B4	Tag	300 mm	2.723	48.800	48.800	0,51
C3	Vinduer	Lav-E	4.381	102.000	71.400	0,62
D3	Ventilation	Vent 2 ¹	1.716	40.500	28.350	0,87
Alle			2.210	343.300	224.550	

1) Mekanisk ventilation lavenergisystem

Hvis der forudsættes en nuværende varmepris på 0,80 kr./kWh og sammenlignes med energispareprisen (ESP), er tiltagene A2, B4, C3 og D3 de mest optimale, se Tabel 14. Tiltagene til isolering af klimaskærmen kan eventuelt drives lidt videre idet niveauet for ESP er 0,5-0,6 kr./kWh, hvor energiprisen er 0,8 kr./kWh. ESP for ventilation med varmegenvinding ligger lidt over varmeprisen, men på baggrund af forudsætning omkring E-faktor og generelle usikkerheder bør en lidt højere ESP ikke være afgørende for om tiltaget vælges. Det ses at et mekanisk ventilationsanlæg med varmegenvinding, der netop opfylder bygningsreglementets minimumskrav til varmevekslereffektivitet, lufttæthed og elforbrug, resulterer i en meget høj ESP.

11 KONKLUSION

Der er et stort behov for udvikling af nye systemløsninger, der kan gøre det mere tilgængeligt for ejerne af de ca. 500.000 parcelhuse i Danmark at renovere og energioptimere. Fokus blev lagt på 6 indsatsområder: Ydervæg, Ydervægsfundament, Vinduer og Døre, Tag, Tagfod og Lufttætning.

De mest almindelige konstruktioner for de forskellige bygningsdele blev beskrevet, og mulige renoveringsløsninger blev foreslået.

For ydervæg og ydervægsfundament var fokus på løsninger med udvendig efterisolering, da dette har en række fordele energimæssigt i forhold til hulmursisolering og indvendig efterisolering. Desuden giver det mulighed for at give huset et nyt arkitektonisk udtryk, og der er gode muligheder for at udvikle nye løsninger. Her er blevet udviklet nye løsninger til facadebeklædning med tegl. For fundamentet er der opstillet løsninger med både lodret og vandret isolering. For vinduer og døre er der ofte meget store besparelser at hente hvis de ikke er blevet renoveret. Der opstilles en række muligheder for udskiftning af ruder eller hele vinduet, til 2- eller 3-lags energiruder. For tag og tagfod opstilles de forskellige løsninger baseret på eksisterende konstruktioner. For lufttætning understreges vigtigheden af at tiltagene udføres korrekt, da dette er centralt for effektiviteten. Metoder til lufttætning gennemgås baseret på konstruktionerne.

Der foreslås 3 pakked løsninger af tiltag der ofte vil kunne udføres samlet, og kan reducere husets energiforbrug, evt. til nyhus status (BR2010) eller lavenergi status (BR2015). Et beregningseksempel viser at økonomien i BR2010-pakken er fornuftig, når man kigger på energispareprisen. Her viser det sig at prisen pr. sparet kWh er lavere end hvis man ikke renoverer og dermed skal betale 0,80 kr./kWh for at bruge energien. Her er regnet med en samlet investering på 343.300 kr.

12 REFERENCER

- BYG-ERFA. (2013). Bygningers lufttæthed - tæthedskrav, bygningsudformning og måling. BYG-ERFA.
- Christensen, G. (1971). *Terrændæk*. Statens Byggeforskningsinstitut.
- Dansk Standard. DS/EN 13187 Bygningers termiske ydeevne - uregelmæssigheder i en bygnings klimaskærm - Infrarød metode (1999).
- Dansk Standard. DS/EN 13829 Bygningers termiske ydeevne – Bestemmelse af luftgennemtrængelighed i bygninger – Prøvningsmetode med overtryk skabt af ventilator. , Pub. L. No. 13829 (2001). Denmark: Dansk Standard.
- Dansk Standard. DS/EN 15242 Ventilation i bygninger - Beregningsmetoder til bestemmelse af luftvolumenstrømme i bygninger inklusive infiltration (2007).
- Dansk Standard. DS/EN ISO 13789 Bygningers termiske ydeevne - Varmeoverføringskoefficienter for transmission og ventilation - Beregningsmetode (2008).
- Dansk Standard. DS 418 Beregning af bygningers varmetab (2011).
- Dansk Standard. DS/EN ISO 12569 Bygningers og materialers termiske ydeevne - Bestemmelse af luftskifte i bygninger - Sporgasmetode. , Pub. L. No. 12569 (2013).
- Energistyrelsen. (2012). *Eksempelsamling om brandsikring af byggeri 2012*. Klima-, Energi- og bygningsministeriet, Energistyrelsen. Retrieved from http://bygningsreglementet.dk/file/218960/exsamling_brand_vtre.pdf
- Gram-Hanssen, K. (2000). *Renovering af Enfamiliehuset: Holdninger til arkitektur og økologi*. Statens Byggeforskningsinstitut.
- Johannesen, S. (2013). *Produktudvikling af facadesystemer til efterisolering af enfamiliehuse*.
- Tommerup, H. (2010). *Energirenoveringstiltag - katalog*. Retrieved from <http://findit.dtu.dk/en/catalog/242152141>

BILAG 1: 1960/70'ER PARCELHUSE

Typisk for periodens typehuse er de præfabrikerede bygningsdele i form af letbetonelementer, gitterspær, eternitplader på taget, vinduer med termorude og oliefyr. Husene er opført primært i ét plan med terrændæk eller krybekælder og med sadeltag med lav taghældning. Der blev også bygget et mindre antal huse i 1½ plan (primært sidst i perioden) eller ét plan med fladt/built-up tag med tagpap (primært først i perioden). Huse med kælder er ret ualmindelige i periodens huse, da bl.a. en del af de huslige funktioner, som man tidligere havde benyttet kælderen til, ikke længere var aktuelle, f.eks. blev vaskekedel erstattet af vaskemaskine, kulkælder/-fyr erstattet af oliefyr.

Hovedparten af husene har en teglstensformur og bagmur i enten tegl, letklinkerbeton, pore-/gasbeton eller træskeletkonstruktion, men der findes også huse opført i massiv porebeton. I mange murede typehuse er der også betydelige lette facadepartier, f.eks. mellem eller under vinduer. Husene er generelt opført med store vinduesarealer. Murpartier fortsætter tit som have mure eller afgrænsning mod naboen (kuldebro ved udvendig efterisolering). Fundamenter, dæk og evt. kældervægge er af beton, evt. kombineret med letbeton. Et gennemgående træk er en kraftig tagrem i træ, der er synlig udefra, og som fungerede som overligger for forskellige muråbninger. Alternativt blev der anvendt tegloverligger.



Figur 30. Parcelhus med synlig tagrem (øverst) og nederst et hus med tegloverligger.

Varmeisoleringsstandard

De historiske krav til varmeisolering i bygningsreglementet fremgår af Tabel 15. Det første reglementet fra 1961 kom til at betyde et spring i isoleringsstandarden. Efter 1961 blev energiforbruget i nybyggeriet næsten halveret i forhold til byggeriet fra 1940'erne. Kravene medførte f.eks. at huse med ydervægge i massive letbetonblokke (700 kg/m^3) skulle være minimum 23 cm tykke (en ikke ringe andel er dog opført i 19 cm tykkelse i form af blokke med lavere densitet og dermed bedre varmeisolering), mens mineralulden på lofter skulle være mindst 8 cm. Mange lofter er efterfølgende, især i starten af 1980'erne, blevet efterisoleret.

Huse, opført efter energikrisen i 1973, kan være født med en bedre isoleringsstandard end de øvrige af periodens huse. Det var dog først i BR77 (med virkning fra primo 1979), at der blev indført væsentlige skærper af varmeisoleringskravene. Isoleringsstandarden for periodens huse er generelt langt fra dagens og fremtidig standard.

Tabel 15. Historiske bygningsreglement krav til varmeisolering af bygningsdele (U-værdier)

Bygningsdele	BR61/72	BR77/82	BR95	BR08	BR10
Ydervæg, tung	1,00	0,40/0,35	0,30	0,20	0,15
Ydervæg, let	0,60	0,30	0,20	0,20	0,15
Terrændæk	0,45	0,30	0,20	0,15	0,10
Loft- og tagkonstruktioner	0,45	0,20	0,15-0,20	0,15	0,10
Etageadskil. mod uopv. rum	0,60	0,40	0,30	0,40	0,40
Vinduer	2,90	2,90	1,80	1,50	1,40
Tagvinduer og ovenlys	-	-	-	1,80	1,70

Varmetab og fordeling

Varmetabet og fordelingen på bygningsdele er beregnet for et typisk 1-plan længehus på 135 m^2 med typiske klimaskærmskonstruktioner. Beregningsforudsætninger og -resultater fremgår af Tabel 16. Vinduers varmetab er korrigeret for solindfald og der er medtaget ventilationstab og forbrug af varmt brugsvand. Huset med har et samlet varmetab på 200 kWh/m^2 , som dækkes af internt varmetilskud og købt energi tilført huset. De største varmetab er relateret til vinduer og døre, tag, ydervægge og ventilation.

Klimaskærmens varmetabskoefficient (ekskl. vinduer og døre) er for eksempelhuset 173 W/K . Denne bør reduceres til ca. 50 W/K (ca. 70 %) for at bringe huset i lavenergiklasse 1.

Tabel 16. Varmetab og fordeling af varmetab for typisk parcelhus

Model for varmetab og fordeling for typisk 1-plan fritliggende parcelhus (længehus)						
Beregningerne er baseret på DS418 "Beregning af bygningers varmetab" og SBI-anvisning 213 "Beregning af bygningers energibehov"						
Parameter	Værdi	Kommentar				
Opvarmet etageareal, m ²	135	Længehus med længde på 2 x bredden				<div>1-plan længehus, 135 m²</div> <div>B</div> <div>L=2*B</div>
Vindues %	25%	pct af opv.etageareal				
Facadeareal inkl. vinduer, m ² /m	2,54	til overside isolering i tag				
Fundamentlængde, m/m ² etageareal	0,375	L=2*B				
Vinduessamlinger, m/m ² ydervæg	0,75	Typisk omfang af samlinger omkring vinduer og døre				
Netto-/bruttoareal, -	0,90	Typisk forhold mellem netto og brutto etageareal				
G, kWh/år	90	Gradtimer i fyringssæsonen baseret på referenceåret DRY og en indetemperatur på 20 gr				
I, kWh/m ²	196	Solindfald baseret på DRY og vinduesfordeling for referencehus (N:26%, S:41%, Ø/V:33%)				
Gw, -	0,5	Total soltransmittans for vinduer				
Rumvolumen, m ³ /m ² nettoareal	2,35					
Bygningsdel	U-værdi/Linietab	Areal/længde	b-faktor	Varmetab	Andel	Konstruktionstype mv.
	W/m ² K/W/mK	m ² /m	-	kWh/år	%	
Tag	0,40	135	1,00	4.860	18	Gitterspær med 100 mm isol
Ydervægge	0,50	95	1,00	4.268	16	Skalmurede letbetonelementer med 75 mm isol, 10% udmuring
Vinduer og døre (tab - soltilskud)	2,80	34	1,00	5.198	19	Trævinduer med termorude
Terrændæk	0,35	122	0,70	2.679	10	30-50 mm isolering
Fundamenter	0,70	51	1,00	3.189	12	Tegl-, letbeton- eller skeletvæg på betonfundament
Vinduessamlinger	0,09	71	1,00	576	2	Ingen kuldebroafbryd. tegl-letbeton alm vinduesplacering
Ventilationstab				4.410	16	Naturlig ventilation, BR luftskifte 0,3 l/s pr. m ² opvarmet etageareal
Varmt brugsvand				1.763	7	Standardforbrug, SBI-anvisning 213, 250 l/m ² /år, opv fra 10-55 gr
Varmetab i alt				26.944	100	Dækkes af internt varmetilskud og købt energi tilført huset
				200 kWh/m²		
Der er set bort fra varierende varmetab fra varmeinstallationer (fx varmefordelingsanlæg, kedel)						

Parcelhuses størrelse, konstruktioner og opvarmningsform

I slutning af 1990'erne gennemførte Byggeriets arbejdsgivere i samarbejde med Byggeriets Udviklings Råd og Realkredit DK i regi af Boligministeriets Projekt Renovering en undersøgelse af "Markedet for renovering af den nyere del af parcelhussektoren" (1998). Resultaterne med hensyn til overordnede tal på husstørrelse, konstruktioner og opvarmningsform gengives kortfattet nedenfor.

Hovedparten af husene har et opvarmet etageareal på 120 – 150 m²:

- 20 % har under 100 m²
- 40 % har mellem 100 til 140 m²
- 40 % har over 140 m² (især 1970-74)

Tagkonstruktion:

- Omkring 70 % er opført med eternittag
- 13 % tegltag
- 9 % cementtegl
- 6 % har built-up/fladt tag

Ydervægge:

- 90 % af husene er opført i mursten
- Resten er primært opført i massive letbetonblokke, især opført i 1. halvdel af 1960'erne

Opvarmning:

- 40 % af periodens huse er opvarmet med fjernvarme
- 48 % har individuelle gas/oliefyr eller lignende
- 8 % er el-opvarmede

Andelen af el-opvarmede huse er dog reduceret betydeligt siden 1998, idet Elsparefonden, fra dens oprettelse i 1997, og indtil 2006/2005 gav tilskud til elvarmekonvertering til fjernvarme/naturgas. I alt ca. 30.000 forbrugere skiftede fra elradiatorer til fjernvarme eller naturgas med støtte fra fonden.

Den store mængde af parcelhuse i Danmark der endnu ikke er renoveret udgør et stort potentiale for energibesparelser. Tilsammen står de for ca. 10% af Danmarks samlede energiforbrug, så det er af stor vigtighed at det gøres lettere at få dette energiforbrug reduceret. Målet med rapporten er at opstille nogle systemløsninger, der vil gøre renoveringsprocessen lettere og mere overskuelig både mht. pris og tid.

DTU Byg
Institut for Byggeri og Anlæg
Danmarks Tekniske Universitet

Brovej, Bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
Tlf. 45 25 17 00

www.byg.dtu.dk

ISSN 1601-8605